

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

STUDIUM VLIVU SLOŽENÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU

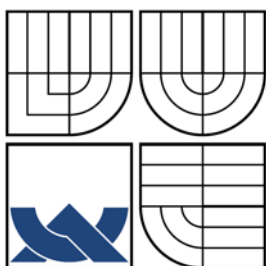
STUDY OF THE INFLUENCE OF COMPOSITON ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF
HIGH PERFORMANCE CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

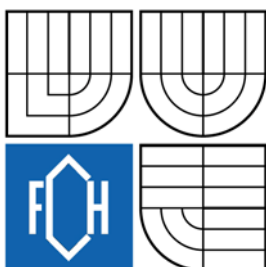
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ VELEBA

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

STUDIUM VLIVU SLOŽENÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU

STUDY OF THE INFLUENCE OF COMPOSITION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF
HIGH PERFORMANCE CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ONDŘEJ VELEBA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JOSEF KRÁTKÝ, Ph.D.

BRNO 2008



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta chemická
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce

FCH-DIP0252/2007

Akademický rok: **2007/2008**

Ústav

Ústav chemie materiálů

Student(ka)

Veleba Ondřej

Studijní program

Chemie a technologie materiálů (M2808)

Studijní obor

Chemie materiálů (2808T004)

Vedoucí diplomové práce

Ing. Josef Krátký, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce

Název diplomové práce:

Studium vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu

Zadání diplomové práce:

1. Literární rešerše zaměřená na vysokohodnotné betony a na statistické metody návrhu experimentu.
2. Příprava série vzorků vysokohodnotného betonu s proměnným obsahem jednotlivých komponent.
3. Měření mechanických vlastností připravených vzorků.
4. Vyhodnocení získaných dat.

Termín odevzdání diplomové práce: 16.5.2008

Diplomová práce se odevzdává ve třech exemplářích na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

Ondřej Veleba
student(ka)

Ing. Josef Krátký, Ph.D.
Vedoucí práce

Ředitel ústavu

V Brně, dne 1.9.2007

doc. Ing. Jaromír Havlica, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá studiem vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotných betonů na bázi portlandského cementu. Bylo připraveno 29 záměsů vysokohodnotných betonů s proměnlivým složením jednotlivých komponent. Mezi zvolené komponenty patřily tyto: cement Aalborg White (52,5 N), mikrosilika, jemně mletá granulovaná vysokopecní struska, velmi jemně mletý křemen, kalcinovaný bauxit a superplastifikátor na bázi polykarboxylátů. Na připravených vzorcích byl sledován vývoj mechanických parametrů (pevnost v tlaku a v tahu za ohybu) a to po 7 a 28 dnech vlhkého uložení. Dosažené pevnosti v tlaku po 28 dnech se pohybovaly v rozmezí hodnot od 92 do 194 MPa, zatímco pevnosti v tahu za ohybu v rozmezí hodnot od 7 do 23 MPa (bez aplikace vláknité výztuže). Na závěr byly sestaveny a vyhodnoceny grafy závislosti mechanických parametrů na obsahu jednotlivých složek v záměsích.

ABSTRACT

This work is devoted to study the influence of the composition on mechanical properties of high performance concrete based on portland cement. 29 samples of high performance concrete (HPC) varying in composition were prepared. The constituents used for HPC preparation were: cement Aalborg White, silica fume, finely ground blast furnace slag, finely ground silica, calcinated bauxite and polycarboxylate based superplasticizer. The mechanical parameters (flexural and compressive strength) of the samples were observed after 7 and 28 days of moist curing. Compressive strength values after 28 days were in the range of 92 to 194 MPa and the flexural strength values were in the range of 7 to 23 MPa (without using of fiber reinforcement). The graphs showing mechanical parameters depending on the mixture composition were constructed and consequently evaluated.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokohodnotný beton (HPC), vysokopevnostní beton (HSC), portlandský cement, hydratace, superplastifikátory (SP), křemičité úlety (SF), vysokopecní struska, kalcinovaný bauxit, kamenivo, analýza rozptylu (ANOVA), plánovaný návrh experimentů (DOE).

KEYWORDS

High Performance Concrete (HPC), high-strength concrete (HSC), Portland cement, hydration, superplasticizers (SP), silica fume (SF), blast furnace slag, calcinated bauxite, aggregates, analysis of variance (ANOVA), design of experiments (DOE).

VELEBA, O. Studium vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu. Brno, 2008. 53 s. Diplomová práce na Fakultě chemické Vysokého učení technického v Brně, Ústavu chemie materiálů. Vedoucí diplomové práce: Ing. Josef Krátký, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....
Ondřej Veleba

Poděkování:

Chtěl bych tímto vyjádřit poděkování vedoucímu mé diplomové práce Ing. Josefu Krátkému, Ph.D., za odborné vedení a cenné rady při jejím zpracování.

OBSAH

1 ÚVOD	7
2 TEORETICKÁ ČÁST	8
2.1 VYSOKOHODNOTNÝ BETON	8
2.1.1 Hlavní faktory ovlivňující pevnost vysokohodnotného betonu	8
2.2 SLOŽKY VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU A JEJICH VLASTNOSTI.....	10
2.2.1 Portlandský cement.....	10
2.2.1.1 Výroba a složení portlandského slínku	10
2.2.1.2 Výroba portlandského cementu.....	12
2.2.1.3 Hydratace portlandského cementu	13
2.2.1.4 Dánský cement Aalborg White	14
2.2.2 Superplastifikátory.....	16
2.2.2.1 Rozdělení a funkce (super)plastifikátorů	16
2.2.3 Křemičité úlety	18
2.2.3.1 Působnost křemičitých úletů v betonu	18
2.2.4 Struska.....	19
2.2.4.1 Chemické složení vysokopecní strusky.....	19
2.2.4.2 Vysokopecní granulovaná struska jako součást cementu	20
2.2.5 Kamenivo a mikrokamenivo	20
2.2.5.1 Obecné vlastnosti kameniva a jeho rozdělení	20
2.2.5.2 Kamenivo pro vysokopevnostní betony	22
2.2.6 Metakaolin	22
2.3 Analýza vlivu proměnného složení na vlastnosti HPC	23
2.3.1 Statistika.....	23
2.3.1.1 ANOVA – Analysis of Variance.....	24
2.3.1.2 DOE – Design of Experiments.....	26
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	31
3.1 Použitý materiál.....	31
3.2 Přístroje a zařízení	31
3.3 Postup přípravy zkušebních vzorků směsí.....	31
3.4 Stanovení pevností připravených vzorků.....	32
3.4.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu.....	33
3.4.2 Stanovení pevnosti v tlaku	34

4 VÝSLEDKY A DISKUZE.....	37
4.1 Složení všech připravených záměsí.....	37
4.2 Výsledky z měření pevností jednotlivých záměsí	38
4.3 Charakterizace záměsí podle obsahu a vlivu jednotlivých složek	41
4.3.1 Vliv podílu cementu na mechanické vlastnosti HPC	43
4.3.2 Vliv podílu mikrosiliky na mechanické vlastnosti HPC	44
4.3.3 Vliv podílu SUK a VPS na mechanické vlastnosti HPC	45
4.3.4 Vliv podílu bauxitu na mechanické vlastnosti HPC.....	47
5 ZÁVĚR.....	48
6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	53

1 ÚVOD

V 70. letech, kdy byly při stavbě některých budov užity betony s vyšší pevností, než betony běžné provenience, bylo namístě klasifikovat tyto výrazem „vysokopevnostní“. Ve skutečnosti se jednalo o pouze vylepšené betony, které byly připraveny za použití stejné technologie jako při výrobě běžného betonu. Pouze materiály na jejich přípravu byly pečlivěji vybírány a kontrolovány.

Postupem času se s nároky na zvýšení kvality používaných materiálů začaly zvyšovat i požadavky na zvýšení kvality (zlepšení použitelnosti) vysokopevnostních betonů. Došlo tak díky vývoji a postupnému zavádění užívání plastifikátorů a superplastifikátorů, jejichž použitím se dosáhlo snížení hodnoty vodního součinitele. To mělo za následek vznik dalších podstatných vlastností betonových materiálů, jako vysokou tekutost, vysoký modul pružnosti, vyšší ohybovou pevnost, nižší permeabilitu, zlepšenou odolnost proti obrušování a lepší trvanlivost. Označení vysokopevnostní beton již nadále nevystihovalo celkové vylepšení vlastností této nově vzniklé skupiny betonů. Stále více se začal prosazovat termín „vysokohodnotný beton“, tedy beton s nejen vyšší pevností, jakožto majoritní vlastností, ale i s mnoha dalšími podstatnými vlastnostmi, které zvyšují míru jeho použitelnosti ve stavebnictví a dalších příbuzných oborech.

Ačkoliv mohou různé vlastnosti vysokohodnotných betonů nabídnout několik výhod oproti běžnému betonu, je zde stále prostor ke zlepšování. Vysokohodnotný beton, tak jako ostatní materiály, má nedostatky. Proto také bude stále mnoho možností použití běžného betonu s pevností v tlaku 20 až 30 MPa pro rozmanité aplikace. Samotný vývoj vysokohodnotného betonu neznamena, že použití běžného betonu je zastaralé [1].

Cílem diplomové práce bylo prostudovat literaturu týkající se problematiky vysokohodnotných betonů a statistických metod návrhu experimentu. Byla připravena série vzorků vysokohodnotného betonu s proměnným obsahem jednotlivých komponent a u takto připravených vzorků byl sledován vliv proměnného obsahu jednotlivých komponent na vlastnosti připravených betonů. Z mechanických vlastností byly měřeny pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 VYSOKOHODNOTNÝ BETON

Z materiálového hlediska není vysokohodnotný beton ničím jiným, než betonem s velmi nízkou pórovitostí. Toho je dosaženo zejména použitím mnohem menšího množství záměsové vody, čímž jsou částice cementu a minerálních příměsí uspořádány mnohem těsněji, než v případě běžné betonové směsi. Strukturálně těsnější uspořádání částic do veliké míry ovlivňuje pevnost betonové směsi, která reprezentuje jednu z hlavních vlastností vysokohodnotných betonů [1].

2.1.1 Hlavní faktory ovlivňující pevnost vysokohodnotného betonu

- *Pórovitost*, je úzce spjatá s pevností v tlaku. Danou souvislost nejlépe popsal již v roce 1892 jistý pan Féret, který tak formuloval svůj slavný vztah:

$$f'_c = k \cdot \left(\frac{c}{c + w + a} \right)^2$$

kde f'_c je tlaková pevnost zhydatované cementové pasty, c je objem cementu, w je objem vody, a je objem vzduchu a k je konstanta závisající na druhu cementu.

Pokud čitatele i jmenovatele ve zlomku podělíme objemem cementu c , pak můžeme předešlý vztah přepsat:

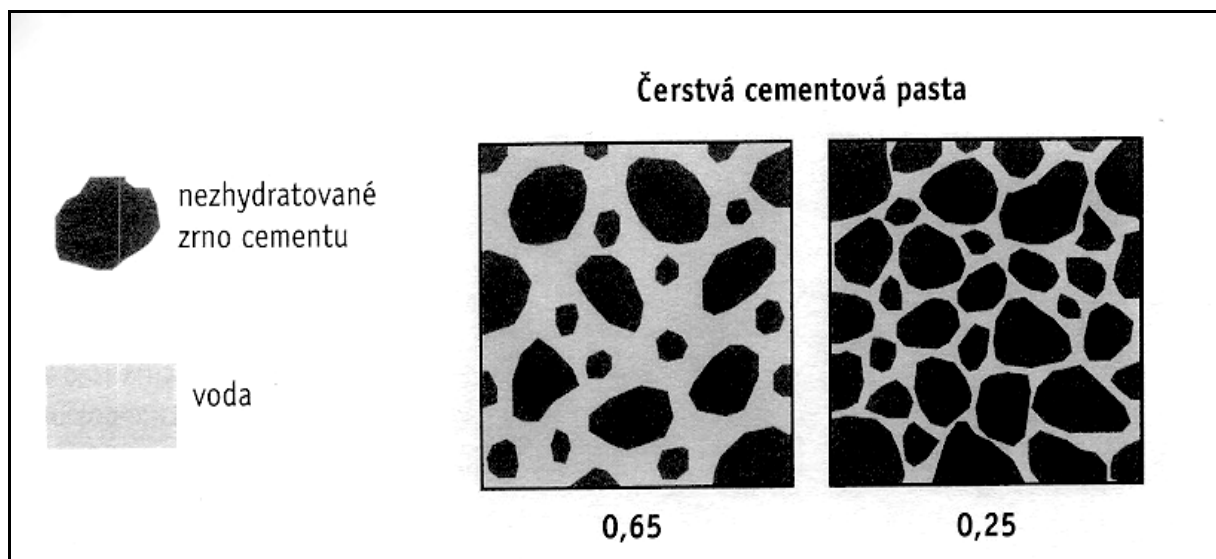
$$f'_c = k \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{w}{c} + \frac{a}{c} \right)^2}$$

Protože objem zachyceného vzduchu bývá obvykle velmi malý, 1 až 2 % ve srovnání s objemem betonu, může být zanedbán výraz a/c , pak lze Féretův vztah přepsat do tvaru:

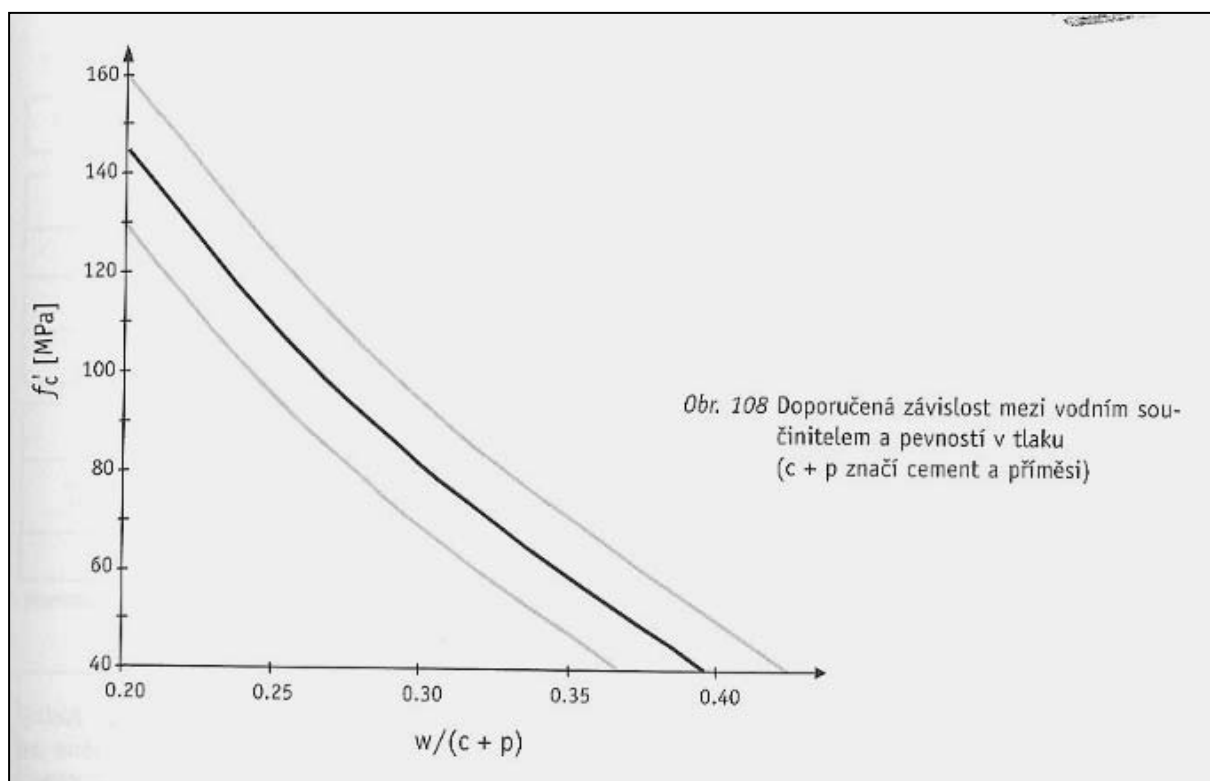
$$f'_c = k \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{w}{c} \right)^2}$$

Ze vztahu vyplývá, že pro růst tlakové pevnosti je nezbytné snížení vodního součinitele, tj. poměru w/c . S poklesem pórovitosti ztvrdlé cementové pasty roste pevnost betonu a to tak dlouho, dokud je kamenivo, zejména hrubé kamenivo, dostatečně pevné [1].

- *Vodní součinitel*, jednoduše hodnota udávající poměr mezi množstvím použité vody a cementu (w/c). Lze jej též počítat jako poměr množství vody k cementu a příměsím ($w/c + p$). Maximální možná redukce vodního součinitele je jedním z klíčových faktorů při výrobě vysokohodnotných betonů. Při nízké hodnotě vodního součinitele se částice cementu v cementové pastě dostávají blíže k sobě (viz. obr. 2.1), což má za následek rychlejší vznik vazeb mezi jednotlivými zrny cementu. Proto v pastách s nízkým vodním součinitelem dochází k rychlému vývoji počátečních pevností [1]. Vhodný vodní součinitel může být určen například z grafu na obr. 2.2.



obr. 2.1: Schématické znázornění dvou čerstvých cementových past s hodnotami vodního součinitele 0,65 a 0,25 [1].



obr. 2.2: Doporučená závislost mezi vodním součinitelem a pevností v tlaku [1].

2.2 SLOŽKY VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU A JEJICH VLASTNOSTI

2.2.1 Portlandský cement

Portlandský cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě. Cementy, tedy i portlandský cement, jsou vyráběny v souladu s ČSN EN 197-1 „Cement Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití“ [2].

Portlandský cement, jakožto čelní představitel skupiny křemičitanových cementů, je tvořen dvěmi hlavními složkami: portlandským slínkem a síranem vápenatým. Portlandský slínek je produktem výpalu surovinové moučky, obsahující vhodný poměr čtyř hlavních oxidů: CaO (60 - 69 hm. %), SiO₂ (18 - 24 hm. %), Al₂O₃ (4 - 8 hm. %), Fe₂O₃ (1 - 8 %) [3]. Síran vápenatý se dodává ve formě sádrovce (CaSO₄ · 2H₂O), hemihydrátu (CaSO₄ · 1/2 H₂O), anhydritu (CaSO₄) nebo jejich směsi [1].

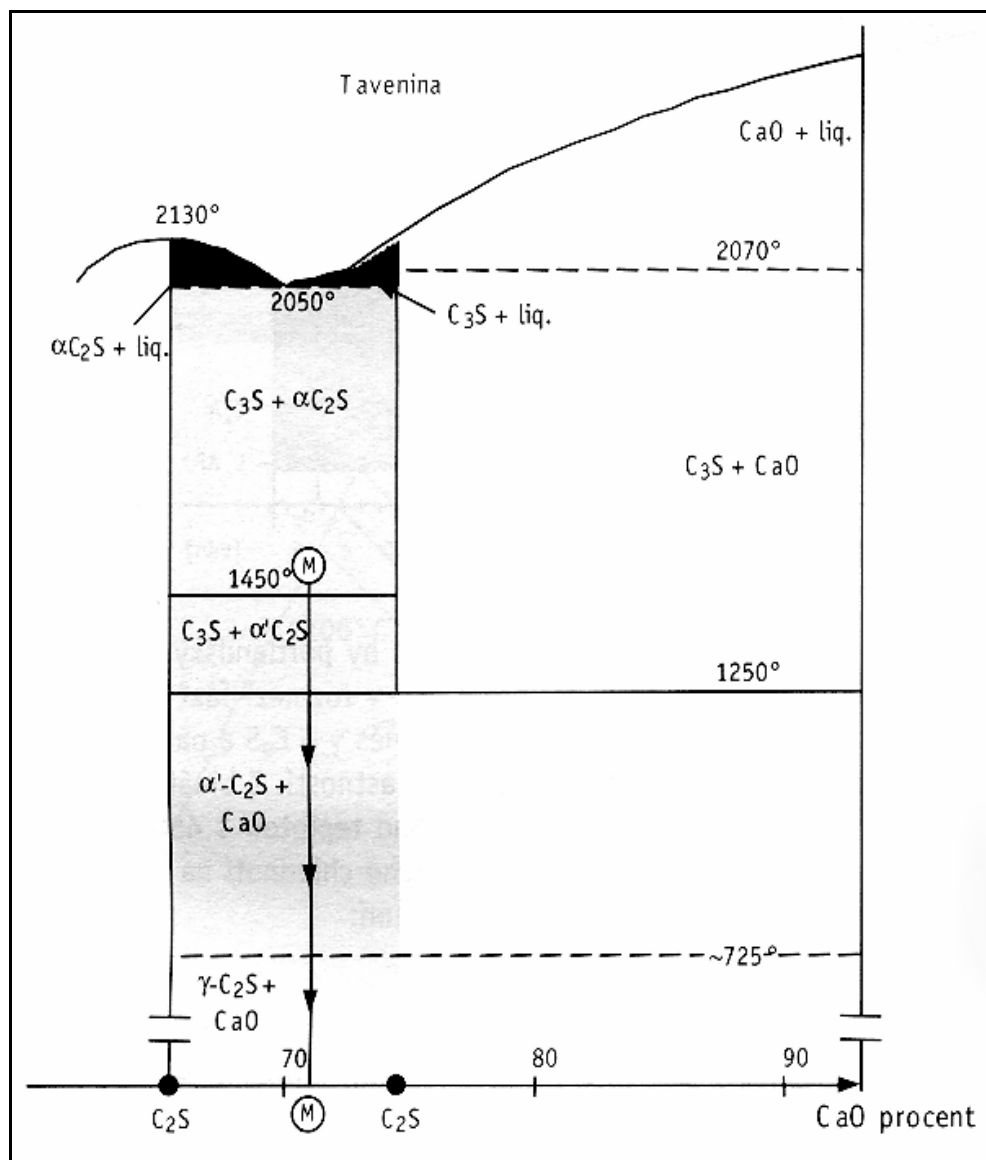
2.2.1.1 Výroba a složení portlandského slínku

Z výrobního hlediska je portlandský slínek výsledným produktem velmi komplexní technologie, která výpalem převádí směs surovin na kalcium-silikátové a kalcium-aluminátové/ferritové fáze.

Z hlediska složení je výsledný portlandský slínek, vycházející z rotační pece (teplota slinování je cca 1 450 °C), směsí dvou krystalických silikátových fází: C₃S (alit) a C₂S (belit) a intersticiální, do jisté míry rovněž krystalické fáze, obsahující především: C₃A (trikalciumaluminát) a C₄AF (celit, brownmillerit). Rovněž jsou přítomny i nečistoty jako periklas (MgO), mrtvě vypálené vápno (CaO) a sírany alkalických kovů.

Aby došlo ke stabilizaci jednotlivých silikátových fází v jejich reaktivních formách, je třeba slínek po vypálení ve slinovací zóně rotační pece velmi rychle ochladit a tak „zmrazit“ fáze v jejich vysokoteplotní formě. Významný vliv na hydraulické vlastnosti slínku má jeho mikrostruktura po ochlazení. Binární fázový diagram systému SiO₂ – CaO (viz. obr. 2.3) ukazuje, že pokud by portlandský slínek vyrobený ze směsi oxidů křemičitého a vápenatého o složení M, které leží v rozmezí fází C₂S a C₃S, byl pomalu ochlazen na pokojovou teplotu, obsahovala by výsledná směs: γ – C₂S a pálené vápno (CaO), tedy termodynamicky nejstabilnější produkty bez hydraulických vlastností, což by bylo nežádoucí. Z binárního fázového diagramu je rovněž jasné, že C₃S není fáze stálá při pokojové teplotě. Nad teplotou 1 450 °C bude rovnovážné složení směsi M obsahovat C₃S a α – C₂S. V průběhu pomalého chladnutí na pokojovou teplotu se bude složení směsi měnit následujícími fázovými transformacemi:

- 1 450 °C: transformace směsi na C₃S a α' – C₂S;
- 1 250 °C: transformace směsi na α' – C₂S a CaO;
- 725 °C: transformace směsi na γ – C₂S a CaO [1].



obr. 2.3: $\text{SiO}_2 - \text{CaO}$ binární fázový diagram oblasti $\text{C}_2\text{S} - \text{C}_3\text{S}$ [1].

Při výrobě portlandského slínku se využívá přídavku oxidů hlinitého a železitého. Je důležité zmínit, že role přídavku těchto dvou oxidů spočívá ve snížení teplot, nutných pro výpal portlandského slínku. Aluminátové a ferritové fáze se v průběhu slinování taví, čímž vzniká tekutá fáze a právě její přítomnost značně snižuje teplotu tvorby C_3S ; umožňuje iontům Ca^{2+} rychleji difundovat do rychleji vznikající fáze C_2S . Z termodynamického hlediska by to znamenalo, že čím je obsah roztavené fáze vyšší, tím je teplota pálení nižší. Praxe však ukazuje, že optimální rozsah taveniny je v rozsahu 12 až 20 °C, vztaženo na celkovou hmotnost slínkových fází. Pokud by byl obsah taveniny příliš vysoký, mohlo by dojít k jejímu uvolňování ze silikátových fází, k usazování na vnitřní stěně pece a následně k poškození žáruvzdorné vyzdívky. Na druhé straně nízký obsah taveniny vede ke ztížení difuze Ca^{2+} iontů do C_2S fáze, takže slínek pak obsahuje méně C_3S a více nezreagovaného vápna – takovýto slínek je velmi abrazivní a rychleji obrousuje žáruvzdornou vyzdívku pece. Změnou poměru Al_2O_3 lze modifikovat hydraulické vlastnosti vzniklého slínku a vyrábět tak různé typy cementů z téměř stejných výchozích surovin [1].

2.2.1.2 Výroba portlandského cementu

Další krok ve výrobě portlandského cementu spočívá v přidavku (v přimílení) optimálního množství síranu vápenatého, dnes převážně ve formě energosádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Energosádrovcem se rozumí průmyslový odpad vznikající při odsiřování v elektrárnách, který je podstatně čistší než rovněž používaný přírodní sádrovec. Nutno podotknout, že je možno přidávat i anhydrit (CaSO_4) či hemihydrát ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$). Zmiňované tři složky se liší svou rozpustností a rychlostí rozpouštění.

Ústřední role síranu vápenatého, tedy důvod jeho přidavku, spočívá v regulaci tuhnutí portlandského cementu. Koncentrace síranových iontů ovlivňuje kinetiku reakce s trikalciem-aluminátem (C_3A) a hydroxidem vápenatým (portlanditem) za tvorby ettringitu ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) – tzn. v přítomnosti síranu vápenatého vzniká z C_3A ettringit, který vytvoří na povrchu hydratujících zrn dočasně relativně stabilní ochrannou vrstvu, zabráňující tak další rychlé hydrataci zrn C_3A , takže během dormantní (mrtvé) periody beton neztrácí zpracovatelnost a může být dopravován a ukládán. V průběhu hydratace dojde v případě optimálního obsahu sádrovce k vyčerpání SO_4^{2-} iontů v roztoku, ettringit se pak stane nestabilní složkou a částečně rekrystalizuje na monosulfoaluminát. Pokud bychom nepoužili síranu vápenatého, případně jiných regulátorů tuhnutí, reagoval by C_3A velmi rychle za vzniku stabilní fáze C_3AH_6 , což by mělo za následek příliš rychlé „bleskové“ tuhnutí betonu.

Pokud teplota v průběhu domílání portlandského cementu v kulovém mlýně přesáhne 110°C , dojde k dehydrataci sádrovce na hemihydrát, který je lépe rozpustný, což může být v některých případech žádaným jevem, poněvadž vyšší rozpustnost hemihydrátu způsobuje vyšší počáteční koncentraci SO_4^{2-} iontů. To má za následek zvýšení tvorby ettringitu na povrchu C_3A zrn, čímž se zlepšují reologické vlastnosti betonu na počátku hydratace. Je-li však příliš značné množství sádrovce přeměněno v hemihydrát, může dojít k tzv. falešnému tuhnutí, které se projevuje rychlým zatuhnutím směsi. Zmíněné falešné tuhnutí je způsobeno hydratací hemihydrátu a srážením (precipitací) vzniklých krystalů sádrovce. Opětovné tekutosti směsi lze dosáhnout dalším mícháním, kdy se většina krystalů sádrovce opět rozpustí v záměsové vodě. Z uvedených důvodů je třeba pečlivě monitorovat teplotu v průběhu mletí slínku a síranu vápenatého. Na základě praktických znalostí bylo stanoveno optimální množství hemihydrátu v portlandském cementu na 40 až 50 % z veškerého množství síranu vápenatého [1].

Protože je portlandský cement vícefázový materiál, závisejí jeho vlastnosti na následujících faktorech:

- chemickém složení výchozí surovinové moučky a použitých paliv,
- technologii použité při výpalu,
- technologii použité při mletí.

Z výše uvedeného tedy vyplývá, že vlastnosti portlandského cementu se „formují“ již při jeho samotné výrobě. Aby však byla spotřebiteli zajištěna určitá stejnoměrnost těchto vlastností, je nutné provádět přejímací zkoušky portlandského cementu. Tyto se skládají z přípravy vzorků pasty nebo normové malty za použití definovaného kameniva a definovaného vodního součinitele. Na vzorcích je pak testováno, zda reologické parametry, počátek a konec tuhnutí a pevnosti jsou v předepsaných mezích. Výrobci portlandského cementu se těmito testům přizpůsobili. Vědí, jak modifikovat složení surovinové moučky, nastavit parametry výpalu, mletí a obsah síranu vápenatého tak, aby vyrobený produkt požadovaným zkouškám

vyhověl. Je však nutno zdůraznit, že většina zkoušek předepsaných normami je prováděna při vodním součiniteli přibližné hodnoty 0,5, z čehož mohou plynout různé problémy, poněvadž se často jedná o hodnotu vodního součinitele vyšší, než jaké bývá použito při výrobě vysokohodnotných betonů, kde je snaha dosáhnout této hodnoty co možná nejnižší.

2.2.1.3 Hydratace portlandského cementu

Schematický popis procesu hydratace [4]:

1) *Smíchání s vodou*

V průběhu tohoto stadia jsou z různých fází portlandského cementu uvolňovány ionty do roztoku. Proces rozpouštění je poměrně rychlý a hydratace je exotermická. Povrch částic cementu se začíná pokrývat hydratovaným kalcium-silikátem (C-S-H gel) vytvořeným z Ca^{2+} , $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ a OH^- iontů, pocházejících ze silikátových fází slínku, a ettringitem vytvořeným reakcí iontů Ca^{2+} , $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$, SO_4^{2-} a OH^- pocházejících z intersticiální fáze a z různých forem síranu vápenatého, přimílaného k portlandskému slínku.

2) *Indukční perioda*

Taktéž nazývaná jako dormantní (mrtvá) perioda. Rychle vzrůstající pH a koncentrace Ca^{2+} iontů v záměsové vodě snižují spolu s hydráty vytvořenými na povrchu částic rozpustnost fází portlandského slínku. Vývoj tepla se značně zpomaluje. V průběhu tohoto stadia se utváří malé množství C-S-H gelu. Pokud je v portlandském cementu správně vyvážen poměr mezi množstvím aluminátových fází a síranových iontů, vznikne také malé množství ettringitu. V průběhu této periody se záměsová voda stane nasyceným roztokem Ca^{2+} iontů, přesto však nedochází k precipitaci portlanditu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a to pravděpodobně díky malé rychlosti tvorby krystalizačních zárodků v porovnání s konkurenční tvorbou C-S-H gelu. Do jisté míry také dochází ke flokulaci zrn.

3) *Počátek tuhnutí*

Hydratace je na konci indukční periody aktivována snížením koncentrace Ca^{2+} iontů v roztoku precipitací portlanditu. Tato nastává v době, kdy v záměsové vodě nejsou prakticky přítomny žádné $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ anionty. Náhlé snížení koncentrace Ca^{2+} a OH^- iontů opětovně nastartuje rozpouštění všech fází portlandského cementu. Vývoj tepla se zpočátku zrychlí jen mírně, poněvadž precipitace portlanditu je endotermická reakce a část tepla se při ní spotřebuje, později se rychlost vývoje tepla stále zvyšuje. Počátek tuhnutí většinou spadá do této doby zrychlení vývoje tepla, s výjimkou případů tuhnutí z důvodu tvorby jehličkových krystalů ettringitu, případně tvorby sádrovce. Hydratované silikátové a aluminátové fáze portlandského slínku začínají mezi částicemi vytvářet vazby, následkem čehož pasta tuhne.

4) Tvrdnutí

Většina portlandských cementů neobsahuje takové množství síranu vápenatého, které by bylo dostačující na reakci s veškerými aluminátovými fázemi portlandského slínku. V průběhu indukční periody dojde tvorbou ettringitu k vyčerpání SO_4^{2-} iontů. To se stane většinou 9 až 15 hodin po smíchání cementu s vodou. Poté se ettringit stane nestabilní složkou a dojde k jeho rekrytalizaci za vzniku monosulfátu ($\text{C}_4\text{ASO}_3\text{H}_{12}$). Díky této reakci se v systému generuje další teplo a dochází k urychlení hydratace silikátových fází.

Hydratační produkty vytvořené v průběhu prvních stadií jsou označovány jako „vnější produkt“, protože rostou ze zrn cementu ven – do mezer mezi jednotlivými zrny. Jedná se o porézní a volnou síť vláknitého C-S-H gelu, jehliček ettringitu, destiček monosulfátu a hexagonálních krystalků portlanditu.

5) Zpomalení hydratace

V tomto stadiu jsou zrna jednotlivých fází slínku pokryta vrstvou hydrátů, která je stále silnější a tedy proto molekuly vody obtížněji pronikají touto vrstvou k nezhydratovaným částicím slínku. Hydratace se zpomaluje, protože je z větší části kontrolována rychlostí difuze molekul vody vrstvou nově zformovaných hydrátů. Hydratovaná cementová pasta má vzhled kompaktní amorfni hmoty, kterou označujeme jako „vnitřní produkt“.

Hydratace portlandského cementu je ukončena buďto ve chvíli, kdy již není v systému přítomna další nezhydratovaná fáze (dobře ošetřený beton o vysokém vodním součiniteli), nebo když voda již nemůže proniknout k nezhydratovaným částicím (velmi kompaktní systémy), nebo v případě, kdy již není v systému k dispozici volná voda (při velmi nízkém vodním součiniteli).

Z pohledu dosažení co nejvyšších hodnot pevností v tlaku je důležité, aby hydrataci portlandského cementu vznikl C-S-H gel o co nejkompaktnější mikrostruktuře, protože silikátové fáze (reprezentující přibližně 80 % hmotnosti portlandského cementu) jsou hlavními nositeli pevnosti. Kompaktní mikrostruktury může být dosaženo snížením vodního součinitele, tedy snížením množství záměsové vody – snížení ale nesmí být na úkor reologických vlastností, které zásadně ovlivňují zpracovatelnost čerstvě vyrobeného betonu. Je také ale zapotřebí zachovat rovnováhu mezi koncentracemi síranových, vápenatých a hlinitanových iontů, aby se předešlo předčasnému zatuhnutí betonu.

2.2.1.4 Dánský cement Aalborg White

Dánský bílý cement Aalborg White je rychle tvrdnoucí portlandský cement s vysokými hodnotami počátečních (2 denních) a standardních (28 denních) pevností. Je vyráběn z vysoce čistého vápence a velmi jemně mletého písku, nebo-li z tzv. bílého kameniva (bílá žula, bílý mramor a rozdrcený pálený křemen). Dle většiny státních norem jej lze charakterizovat jako cement s nízkým obsahem alkálií (méně než 0,3 %) a vysokou odolností vůči působení síranů (obsah minerálu C_3A v cementovém slínku je menší než 5 %) [5].

Tabulka 2.1: *Dánský cement Aalborg White – údaje o výrobku* [6].

Typ	CEM I 52,5 R
Pevnostní třída	52,5 R
Měrný povrch (Blaine)	400 [m ² /kg]
Rozpínavost	0 - 2 [mm]
Ztráta žiháním	0 - 1,0 %
Absolutní hustota	3120 - 3180 [kg/m ³]
Objemová hmotnost	1100 [kg/m ³]
Počátek tuhnutí (Vicat)	113 min.

Tabulka 2.2: *Dánský cement Aalborg White – zastoupení minerálů a oxidů ve slínku* [6].

minerál	[%]	oxid	[%]
C ₃ S	70	SiO ₂	24
C ₂ S	20	Al ₂ O ₃	2,1
C ₃ A	5	Fe ₂ O ₃	0,4
C ₄ AF	1	CaO	69

Tabulka 2.3: *Dánský cement Aalborg White – zastoupení ostatních složek* [6].

ostatní složky	[%]
CaSO ₄	4
SO ₃	2,1
MgO	0,6
Na ₂ O	0,2
Cl ⁻	0,01
Cr ⁶⁺	≤ 2 mg/kg

Tabulka 2.4: *Dánský cement Aalborg White – pevnost cementu podle DS/EN 196-1* [6].

stáří	pevnost [MPa]
1 den	18 - 24
2 dny	34 - 42
7 dní	55 - 67
28 dní	70 - 79

2.2.2 Superplastifikátory

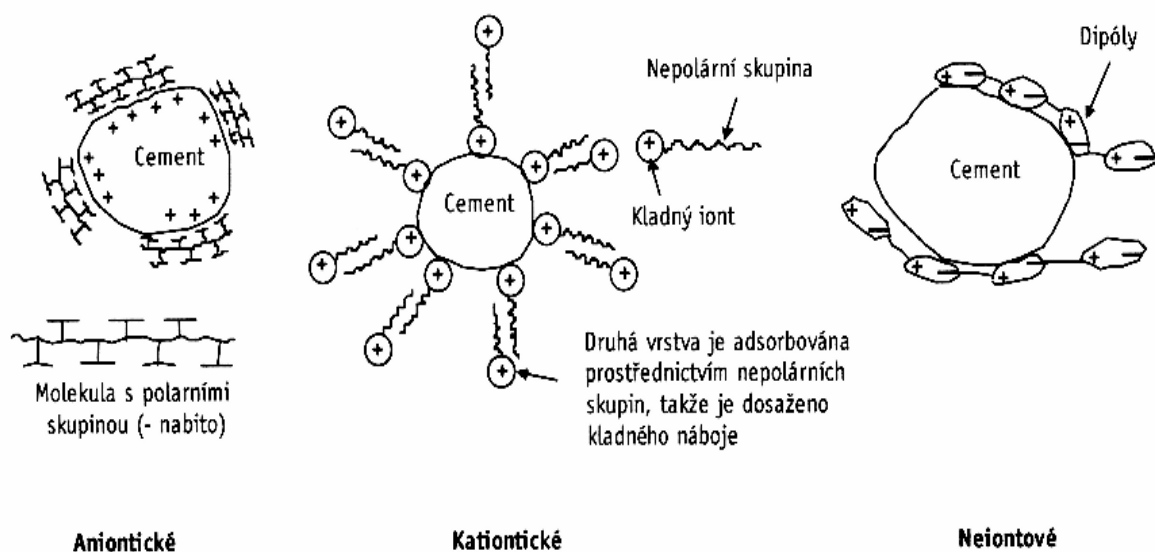
Čím méně vody je při dané dávce cementu do betonu přidáno, tím vyšších pevností beton dosáhne – poučka známá již více jak sto let. Voda je samozřejmě podstatnou složkou betonu, která splňuje dvě základní funkce: fyzikální funkci – dává betonu požadované reologické vlastnosti a chemickou funkci – umožňuje hydrataci cementu. Ideální beton by měl obsahovat pouze takové množství vody, které mu umožní dosažení maximální pevnosti a zároveň mu zaručí reologické vlastnosti, tolik potřebné pro jeho zhutnění.

Skutečnost je však taková, že současné portlandské cementy neumožňují docílení tohoto ideálního stavu betonu a to z toho důvodu, že zrna cementu, vyznačující se množstvím nenasyčených povrchových nábojů, mají výraznou tendenci k flokulaci, zejména pokud se dostanou do kontaktu s tak polarizovanou kapalinou, jakou je právě voda. Ve flokulované struktuře se uvnitř flokulí zachycuje část vody, která pak není k dispozici na ztekucení směsi. Proto pro dosažení určité míry zpracovatelnosti betonu je nezbytné použít více vody, než je zapotřebí k úplné hydrataci všech cementových zrn. Tato nadbytečná voda, která nikdy nezreaguje s cementem, vytváří poréznost cementové pasty a tím pádem způsobuje zhoršení mechanických vlastností betonu a taktéž způsobuje pokles jeho trvanlivosti.

Protože je nemožné vyrobit portlandský cement, jehož zrna by neflokulovala, bylo nutno pro podpoření hydratace nalézt chemické látky, které by určitou měrou potlačily tento sklon k flokulaci a tím pádem by redukovaly množství záměsové vody. Asi před 60 lety bylo zjištěno, že určité organické molekuly, známé svým dispergačním účinkem, mohou být použity k neutralizaci povrchových nábojů cementových zrn, čímž mohou zároveň redukovat jejich sklon ke flokulaci – tyto molekuly jsou dnes hojně užívány a prodávány jako superplastifikátory, plastifikátory a disperzní činidla [1].

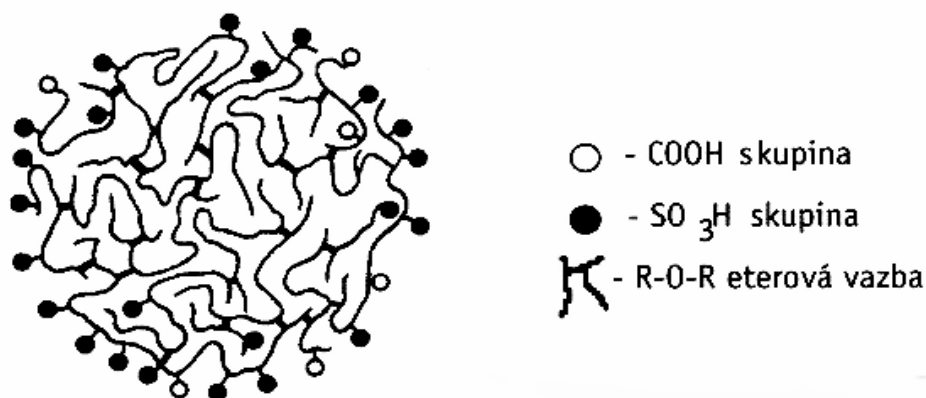
2.2.2.1 Rozdělení a funkce (super)plastifikátorů

Plastifikátory, co se týče chemismu, mohou být aniontové, kationtové nebo ne-iontové (nepolární) povahy. Plastifikátory aniontového a kationtového typu jsou tvořeny molekulami, které mají na konci řetězce výrazný náboj, pomocí něhož neutralizují opačné elektrické náboje na povrchu částic cementu. V případě nepolárních plastifikátorů působí molekuly jako dipóly, obklopující cementovou částici, tedy cementové zrno (viz. obr. 2.4).



obr. 2.4: Typy dispergujících činidel [1].

Po téměř 40 let dostačovaly pro technologii betonu plastifikátory první generace a lignosulfonáty, jejichž molekuly působí jako výborné disperzní činidlo (viz. obr. 2.5). Použitím lignosulfonátů je možné redukovat množství vody o 5 až 10 %, aniž by se projevil vedlejší účinky. Postupem času byla v Německu objevena nová skupina plastifikátorů, založených na kondenzátech sulfonovaných formaldehydů melaminů – dnes jsou tyto látky známy jako superplastifikátory [1].



obr. 2.5: Schematické znázornění lignosulfonátu [1].

Chemicky vzato se jedná o vodorozpustné, polymerní molekuly s různou velikostí náboje na polymeru, které neutralizují povrchové náboje cementových zrn a tím zabráňují jejich flokulaci ve vodě [7].

Z obecného hlediska lze říci, že superplastifikátory jsou přísady do betonu, které svým „chováním“ snižují množství vody potřebné k hydrataci cementu – zpomalují hydrataci C₃A fáze (tzv. retardační účinek – tvorba vrstvičky ettringitu na povrchu částic C₃A, čímž dochází k znesnadnění hydratace zrn této nejreaktivnější minerální fáze v portlandském cementu), což se samozřejmě projevuje zlepšením mechanických vlastností betonu, zejména pak dochází ke zvýšení pevnosti v tlaku. Existují čtyři základní skupiny komerčních superplastifikátorů:

- *Naftalenové superplastifikátory* – jedná se o sulfonované soli polykondenzátů naftalenů a formaldehydů, obvykle označované jako sulfonáty polynaftalenů.
- *Melaminové superplastifikátory* – sulfonované soli polykondenzátů melaminu a formaldehydu, obvykle označované jako sulfonáty polymelaminu.
- *Lignosulfonáty* – s velmi nízkým obsahem sacharidů a povrchově aktivních činidel.
- *Polykarboxyláty (polykarboxyethery, PCE)* – jako je například Glenium ACE 40, mnou používaný typ SP.

PCE přísady se přimknou k povrchu cementového zrna a elektrostatickým odpuzováním umožní jemnější rozptýlení cementových zrn, čímž vznikne homogenní cementový tmel, který zajišťuje dobrou zpracovatelnost. Současně dlouhé postranní řetězce polyetherů vytváří prostorovou bariéru mezi cementovými zrny. Toto stérické odstínění zajišťuje také po začátku hydratace dispergaci cementových částic a umožňuje prodloužení zpracovatelnosti bez výraznějšího zpomalení počátečních pevností [7].

V současnosti se nejvíce používají první dva typy z uvedených superplastifikátorů. Komerční superplastifikátory mohou být používány v kombinaci s plastifikátory a též i se zpomalovači nebo urychlovači tuhnutí [1].

2.2.3 Křemičité úlety

Křemičité úlety (někdy označované jako mikrosilika) jsou vedlejším produktem při výrobě křemíku, ferrosilicia a dalších slitin křemíku. Samotný křemík i jeho slitiny se vyrábějí v obloukové elektrické peci, kde je křemen redukován v přítomnosti paliva (uhlí) a železa (v případě výroby ferrosilicia). Během redukce křemene vzniká v dosahu elektrického oblouku plynný SiO, který uniká směrem k horní části pece, kde se ochlazuje, poté kondenzuje a následně se oxiduje ve formě velmi jemných částic SiO₂, které jsou shromažďovány v odlučovacím systému – prachových filtrech. Nutno zmínit, že mezi částicemi křemičitých úletů bývá zachyceno i určité malé procento odlišných částic, jedná se o velmi malé procento nečistot (velmi jemné částice křemene, částice paliva, uhlíkové částice z elektrod) [1].

Z hlediska klasifikace lze křemičité úlety zařadit mezi tzv. minerální příměsi, které svou přítomností snižují hodnotu pórovitosti betonu a zároveň zmenšují velikost i tak přítomných pórů [9].

Křemičité úlety obsahují 80 až 98 % amorfního SiO₂ (siliky) ve tvaru kulatých zrn o průměrné velikosti 0,1 μm až 0,2 μm (jsou tedy 100krát menší než průměrné zrno cementu), při měrném povrchu 15000 až 30000 m².kg⁻¹ a měrné hmotnosti 2120 kg.m⁻³ [10].

2.2.3.1 Působnost křemičitých úletů v betonu

Blahodárný účinek křemičitých úletů na mikrostrukturu a mechanické vlastnosti betonu nespočívá jen v jejich pucolánové aktivitě, ale také v jejich fyzikálním účinku, který je znám jako účinek filleru (plniva). Díky své jemnosti mohou částice křemičitých úletů vyplňovat mezery mezi většími zrny cementu, pokud jsou dobře dispergovány v přítomnosti vhodně zvoleného superplastifikátoru, jak je znázorněno na obr. 2.6. Účinek filleru je také naprosto nezbytný pro růst zpracovatelnosti betonů s velmi malým vodním součinitelem. Výsledná matrice, obsahující křemičitý úlet, je hutná i před tím, než se vyvinou chemické vazby mezi cementem.

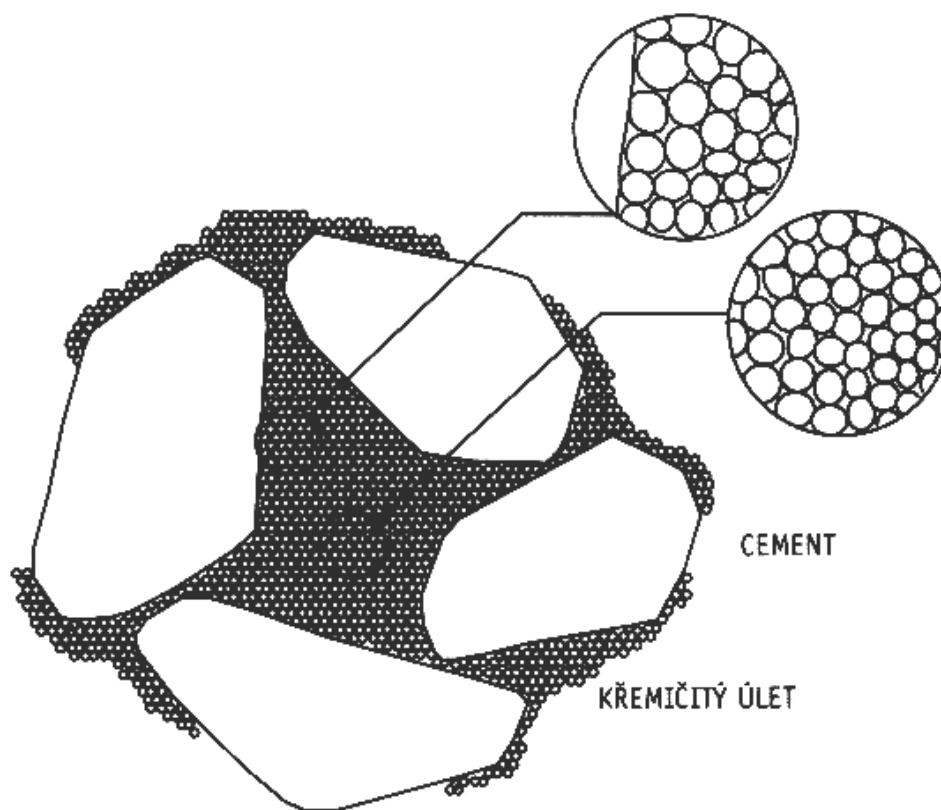
Přídavek křemičitých úletů výrazně redukuje jak vnitřní, tak vnější odměšování vody v betonové směsi – kvůli extrémně malým rozměrům částic úletů. Tato skutečnost je z hlediska mikrostruktury velmi důležitá, neboť se zásadním způsobem mění mikrostruktura tranzitní zóny mezi cementovou pastou a zrny kameniva a cementovou pastou a výztuží. Tranzitní zóna se tak stává mnohem kompaktnější, než je tomu u betonů, které neobsahují křemičité úlety. Ve směsích s velmi nízkým vodním součinitelem, které jsou jinak velmi lepivé, mají křemičité úlety ztekucující účinek, tedy zlepšují reologické chování směsi.

Dané chování lze vysvětlit tím, že tyto částičky vytěsňují vodu z mezer mezi flokulovanými zrny a tak roste podíl vody pro ztekucení betonové směsi.

Použitím křemičitých úletů v betonech získáme velmi kompaktní mikrostrukturu s velmi těsnou a pevnou vazbou mezi kamenivem a hydratovanou cementovou pastou, čímž se v nemalé míře zlepší tlakové pevnosti betonu, zejména mezi 7 a 28 dny. Jako další následky použití křemičitých úletů lze označit redukci poréznosti cementové pasty – částice vyplní volné póry, zajištění dostatečné hutnosti a snížení permeability betonové směsi [1].

Maximální množství křemičitých úletů, které lze vzít v úvahu pro výpočet hodnoty vodního součinitele (w/c) a výpočet obsahu cementu, musí vyhovovat požadavku hmotnostního poměru: křemičité úlety / cement $\leq 0,11$ [11].

Použitím aktivních příměsí do betonu, tedy křemičitých úletů, se pro dosažení vhodné zpracovatelnosti zvyšuje potřeba vody o 1 litr na každý použitý kilogram těchto částic [10].



obr. 2.6: Zaplnění prostorů mezi zrny cementu křemičitým úletem (H. Bache) [1].

2.2.4 Struska

Struska, přesněji řečeno mletá vysokopecní granulovaná struska, je vedlejším produktem výroby surového železa ve vysoké peci. Jedná se o latentně hydraulickou látku, vznikající rychlým ochlazením vhodně složené tekoucí taveniny zásadité strusky, která odpadá jako vedlejší zplodina při výrobě železa ve vysoké peci. Je-li tavenina strusky rychle zchlazena vodou, zabrání se tak její krystalizaci, čímž se stabilizuje její sklovitý charakter. Rychlé ochlazení má udržet strusku ve skelném stavu, neboť hlavně taková má při vhodném složení latentně hydraulické vlastnosti. Je schopna v alkalickém prostředí reagovat za přítomnosti síranů a hydroxidu vápenatého na hydráty podobným způsobem jako portlandský slínek [12].

2.2.4.1 Chemické složení vysokopecní strusky

Chemické složení vysokopecních strusek je dosti proměnné. Průměrné zastoupení jednotlivých chemických složek je uvedeno v následující tabulce 2.5.

Tabulka 2.5: *Průměrná chemická složení vysokopecních strusek*

složka	[hm. %]
CaO	30 - 50
SiO ₂	30 - 43
Al ₂ O ₃	5 - 18
MgO	1 - 15
FeO + Fe ₂ O ₃	0,2 - 3
S (ve formě S ²⁻)	0,5 - 3
MnO	0,2 - 2

Posouzení vhodnosti a kvality strusky se provádí na základě výpočtu a vyhodnocení celé řady modulů. Pro jejich vyhodnocení slouží výsledky chemického rozboru. Z hlediska využití vysokopecní granulované strusky pro výrobu pojiv je rozhodující její chemické a fázové (mineralogické) složení. Tyto dva parametry významně ovlivňují latentní hydraulickou schopnost strusky [12], tzn. schopnost látky reakcí s Ca(OH)₂ za normální teploty ve vodním prostředí tvrdnout [10].

2.2.4.2 Vysokopecní granulovaná struska jako součást cementu

Vysokopecní granulovaná struska se pro výrobu směsných cementů používá běžně již od roku 1945. Pro portlandské cementy platí, že se vzrůstajícím měrným povrchem těchto cementů dochází k nárůstu jejich pevností. V závislosti na druhu a složení strusky se tento nárůst projevuje buď v počátečním období tvrdnutí cementu, nebo dochází k nárůstu až dlouhodobých pevností [12]. Struska může být smíchána s cementem po odděleném mletí nebo semleta společně se slínkem, anebo se struska přidává jako přísada cement nahrazující [1]. Betony s příměsí strusky mají zvýšenou odolnost proti síranovým vodám a velmi pomalu uvolňují hydratační teplo. Z hlediska pevnosti záleží na složení strusky a jejím měrném povrchu – čím větší povrch, tím je větší její aktivita [13].

2.2.5 Kamenivo a mikrokamenivo

2.2.5.1 Obecné vlastnosti kameniva a jeho rozdělení

Kamenivo je polydisperzní partikulární látka, která může tvořit až 80 % složení betonové směsi. U kameniva určujeme pomocí granulometrické zkoušky tzv. zrnitost, tedy skladbu zrn různého tvaru. Pro určení zrnitosti u větších částic používáme sítové analýzy, kdežto pro určení zrnitosti u mikročástic můžeme použít přístroj zvaný sedimentograf, nebo analýzy pomocí difrakce laserového paprsku. Velikost částic lze vyjádřit jako průměr myšlených kulových zrn, která mají stejnou usazovací rychlost [14]. Statisticky určujeme průměr velikosti jednotlivých zrn jako střední velikost částic d [15]:

$$d = \sqrt[3]{\frac{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}{n} \cdot \frac{6}{\pi}}$$

Zrnitost vyjadřujeme křivkou zrnitosti. K jejímu výpočtu je potřeba znát hodnotu maximálního zrna kameniva D_{MAX} a hodnotu průměrné zrnitosti d_{50} . Se zrnitostí souvisí povrch kameniva, kdy platí, že čím menší částice kameniva, tím více vody je potřeba na adsorpci, čímž se také zvyšuje celkový vodní součinitel směsi, což v konečném důsledku vede ke snížení hodnot výsledných pevností. Množství vody je tedy proto korigováno přídatkem superplastifikátoru. Měrný povrch lze nalézt pomocí empirického výpočtu [13]:

$$S_K = \sum \left(\frac{S_f \cdot \psi_K \cdot p_i}{100 \cdot V_i \cdot \rho_K} \right) = 90 \cdot \frac{\psi_K}{\rho_K} \sum \frac{p_i}{d_i} \quad [\text{m}^2 / \text{kg}]$$

S_{Ki} – povrch [m^2]

V_i – objem koule o průměru zrna d_i [m^3]

d_i – velikost frakce horního síta [mm]

p_i – hmotnostní podíl i-té frakce [%]

ρ_K – objemová hmotnost kameniva [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

ψ_K – empirický koeficient vyjadřující odchylku tvaru zrna od tvaru koule.

Skladbu kameniva volíme tak, aby pokud možno vznikl co nejmenší počet mezer a dutin, které by mohly po zatvrdnutí betonového kompozitu způsobit jeho destrukci. Je tedy nutné, abychom výběru kameniva věnovali vždy patřičnou pozornost, poněvadž s rostoucí tlakovou pevností betonu, se právě kamenivo stává jeho nejslabším článkem [1].

Tabulka 2.6: Rozdělení kameniva [10]

ZNAK	ROZDĚLENÍ	PŘÍKLAD
objemová hmotnost	lehké (pórovité) do $2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ hutné (od 2000 do $3000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) těžké (nad $3000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	liapor, experlit magnetit
původ	těžené nebo drcené přírodní nebo umělé	
velikost zrn	jemné (do $0,25 \text{ mm}$) drobné (od 0 do 4 mm) hrubé (od 4 do 63 mm) směs kameniva	moučka písek, filer drť, štěrk štěrkopísek
frakce – označení kameniva podle velikosti ok dolního (d) a horního (D) síta.	úzká: poměr otvorů sít (d/D) ≤ 2 široká: poměr otvorů sít (d/D) > 2	$0/2, 2/4, 4/8$ $4/11, 8/32$

2.2.5.2 Kamenivo pro vysokopevnostní betony

Mezi kamenivo vysokých pevností patří tavený bauxit, korund, čedič, žula aj. Výběr hrubého kameniva pro vysokopevnostní (vysokohodnotné) betony musí být proveden po pečlivém studiu jeho mineralogie a petrografie. Je třeba se ujistit, že všechna zrna jsou dostatečně pevná, aby nedošlo k předčasnému porušení vysokohodnotného betonu.

Co se použitelnosti drobného kameniva týče, je vhodné použít spíše kamenivo odpovídající horní hranici zrnitosti. Jelikož vysokohodnotné směsi obsahují vyšší podíly cementu a příměsí, je vhodné použít hrubšího, nežli jemnějšího písku, poněvadž tak docílíme lepší zpracovatelnosti a nižší segregace. Kromě toho se volba použít hrubšího písku odrazí v menší spotřebě vody, což je výhodné z hlediska pevnosti i hospodárnosti [1].

Mimo křemičitých úletů je do připravovaných směsí možno použít také srážený oxid křemičitý, speciálně upravený mletý křemen (SUK), normované písky, vápenec, velmi jemné popílky, jemný korund, tavený bauxit, čedič, nebo ultra jemný oxid titaničitý (titanová běloba) [16].

Výběr kameniva do jisté míry souvisí s pórovitostí betonového kompozitu a tím také i s jeho výslednou pevností. Na pórovitost čerstvých betonových směsí má značný vliv kvalita povrchu kameniva a samozřejmě i hodnota jeho měrného povrchu. Při použití drceného, jemného či hrubého kvalitního kameniva s větším měrným povrchem se kolikrát nedosáhne vyšších konečných pevností. Je známo, že četné jemné práškové materiály zadržují na svém relativně velkém měrném povrchu obtížně odstranitelné mikrobublinky vzduchu a z toho důvodu má pyknometricky stanovená měrná hmotnost nižší hodnotu. Mikrokašenivo (bauxit, korund, karbid křemíku aj.) ovlivňuje růzností svého povrchu obsah vzduchu, působí příznivě na celkový objem i tvar pórů a tím i na zpracovatelnost čerstvé betonové směsi. Důležitým faktorem ovlivňující výslednou kvalitu betonové směsi je adheze cementového tmele k povrchu kameniva – vlastnosti kontaktní (tranzitní) zóny, kterou výrazně ovlivňuje přítomnost mikrokašeniva. Je také známo, že čím menší částice kameniva, tím více vody je potřeba na adsorpci a tím se také zvyšuje celkový vodní součinitel směsi, což v konečném důsledku vede ke snížení hodnot výsledných pevností. Proto se v praxi množství vody koriguje přídatkem superplastifikátoru. Nicméně, nižší hodnoty vodního součinitele můžeme docílit již při samotném míšení směsi a to například pomocí tzv. vysokosmykového míchání (high shear mixing), jehož použitím jsou složky obsažené ve směsi navíc dodatečně mlety a zároveň tak i mechanicky aktivovány. Ztvrdlé kompozity se pak vyznačují mimořádně nízkou pórovitostí, díky čemuž dosahují vyšších pevností, zejména v ohybu [17].

2.2.6 Metakaolin

Metakaolin je teplotně aktivovaný alumino-silikátový materiál získaný kalcinací přírodní suroviny kaolinitu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) v rozmezí teplot 650 až 800 °C [18]. Jedná se o přechodnou, metastabilní fázi. Na rozdíl od minerálu kaolinitu se metakaolin vyznačuje málo výraznou krystalickou strukturou – spíše má amorfni charakter a projevuje se zde i částečné zhutnění zapříčiněné dehydratací původního materiálu.

Metakaolin je ve světě využíván ve stavebnictví jako částečná náhrada cementu. Předností částečné náhrady cementu metakaolinem je v některých případech zvýšená mechanická pevnost hotových betonových výrobků (až o 20 % po 28 dnech) a jejich zvýšená odolnost

proti působení chemicky rozpustných látek. Dále se metakaolin používá také jako provzdušňující přísada, což zlepšuje mrazuvzdorné vlastnosti betonů.

Chemické složení metakaolinu není tak proměnné jako je tomu u vysokopecních strusek. Zastoupení jednotlivých chemických složek popisuje následující tabulka 2.7 [12].

Tabulka 2.7: Chemické složení metakaolinu

složka	[hm. %]
CaO	0,25 - 0,30
SiO ₂	51 - 53
Al ₂ O ₃	40 - 42
MgO	0,35 - 0,40
Fe ₂ O ₃	1,2 - 1,4
TiO ₂	0,7 - 0,75
K ₂ O + Na ₂ O	1,35 - 1,45
Další nestanovené oxidy	0,50

2.3 Analýza vlivu proměnného složení na vlastnosti HPC

2.3.1 Statistika

Statistika je vědecká disciplína zabývající se studiem dat popisujících existující variabilitu (zajímají nás rozdíly i podobnosti hromadných jevů) a hodnocením hypotéz tato data vysvětlujících. Statistika se postupem času stala vysoce propracovanou vědeckou naukou, která zahrnuje velmi širokou škálu kvantitativních metod umožňujících zjišťovat „stav“ věcí a poměrů v rozličných strukturách.

Dnes se pod pojmem statistika skrývají dva vědecké obory – popisná a matematická statistika.

Matematická statistika: Poskytuje metody správného usuzování z výběru na populaci. Soubor těchto metod se označuje jako statistická indukce a jejich aplikace se nazývají induktivní statistika. Matematická statistika je tedy matematický obor, který se zabývá aplikacemi teorie pravděpodobnosti a hledá tak správné metody usuzování z neúplných údajů, zatížených ještě navíc náhodným kolísáním.

Popisná statistika: Je složena z metod pro zjišťování a sumarizaci informací. Zahrnuje konstrukci grafů, diagramů a tabulek a výpočet různých popisných charakteristik (aritmetický průměr, rozptyl, relativní četnost aj.).

Vlastnosti statistických jednotek, které se mění od jedné jednotky ke druhé se nazývají *statistické znaky* nebo *veličiny*, případně *proměnné*. Statistické znaky můžeme rozdělit na *kvantitativní veličiny*, které nám poskytují číselnou informaci a *kvalitativní veličiny*, jež poskytují informaci, která není číselná, ale je dána slovní definicí. Kvantitativní veličiny mohou být *diskrétní* nebo *spojité*. *Diskrétní veličina* je taková veličina, jejíž možné hodnoty tvoří konečnou nebo spočetně nekonečnou množinu čísel, obvykle množinu celých čísel. Naopak *spojitá veličina* je dána hodnotami tvořícími nějaký číselný interval.

Pozorováním nebo měřením hodnot veličiny na několika statistických jednotkách získáme vstupní *data*. Jedná se o informace, které shromažďujeme, třídíme a následně analyzujeme. Soubor všech pozorovaných hodnot sledovaného statistického znaku, které máme k dispozici, nazýváme *datový soubor* nebo *množina dat*. Množinu všech statistických jednotek, u nichž zkoumáme příslušné statistické znaky, nazýváme *statistický soubor*. Statistický soubor všech jednotek, který je vlastním předmětem sledování a o němž chceme provádět závěry, se nazývá *základní soubor* nebo *populace*. Část základního souboru, která sloužila k získání informací, nazýváme *výběrový soubor*.

Výsledkem statistického šetření je zpravidla velké množství číselných údajů, které jsou většinou nepřehledné. Aby vynikly charakteristické rysy a zákonitosti analyzovaného souboru a aby se údaje staly přehlednými, musíme je seřadit. *Tříděním* tedy rozumíme rozdělení statistických jednotek souboru do takových skupin, v nichž co nejlépe vyniknou charakteristické vlastnosti zkoumaných jevů. Výsledkem třídění je uspořádání údajů do přehledné formy. Nejčastěji používané pojmy při třídění dat jsou:

- *Třídy* – Skupiny, do kterých jednotlivá data rozdělujeme.
- *Četnost třídy* – Počet jednotlivých dat v dané třídě.
- *Relativní četnost třídy* – Podíl četnosti třídy a celkového počtu dat v datovém souboru [19].

Statistika je v dnešní moderní době skutečně velmi rozšířenou vědní disciplínou, mající velmi důležitou úlohu v mnoha různých odvětvích, zejména pak v systému řízení procesů a zabezpečení jejich jakosti. Zabývat se popisem jednotlivých pojmů (metod, technik) matematické či popisné statistiky, by zajisté vydalo na dosti rozsáhlou knihu, což by se jen stěží dalo zakomponovat do této diplomové práce. Z tohoto důvodu jsem se jakožto autor práce rozhodl, zaměřit se především na dvě metody (DOE – návrh plánovaného experimentu, ANOVA – analýza rozptylu), kterých bylo dále využito v experimentální části. Obě zmiňované metody spolu velmi úzce souvisí.

2.3.1.1 ANOVA – Analysis of Variance

Analýza rozptylu (variance), anglicky *Analysis of Variance* (ANOVA) je statistickou technikou, která umožňuje srovnávání vlastností více výběrů na základě analýzy složek celkové variance. ANOVA se v technické praxi používá buď jako samostatná technika nebo jako postup umožňující analýzu zdrojů variability u lineárních statistických modelů. Ze statistického hlediska lze analýzu rozptylu chápat jako speciální případ regresní analýzy, kde vysvětlující proměnné mají pouze binární charakter a mohou nabývat pouze hodnot 0 nebo 1. Jednoduše řečeno, ANOVA je jedna ze statistických technik, umožňující určení relativního podílu jednotlivých faktorů (proměnných) na jakosti výstupu (kvalitě výsledku experimentu).

Podstatou analýzy rozptylu je rozklad celkového rozptylu (variance) analyzovaných dat na složky objasněné (známé zdroje variability) a složky neobjasněné (rozptyl, který je způsoben jinými vlivy), o nichž se předpokládá, že jsou náhodné. Následně se testují hypotézy o významnosti jednotlivých zdrojů variability.

V technické praxi se ANOVA uplatňuje zejména v následujících úlohách:

- Určení významnosti způsobu přípravy vzorků (tzv. zpracování) na výsledek analýzy, respektive experimentu

- Určení vlivu typu přístroje/zařízení, lidského faktoru a obsluhy na výsledek měření
- Zpracování různých mezi laboratorních experimentů a určení významnosti rozdílů mezi laboratoři na výsledek analýz
- Určení statistické významnosti efektů v technice plánovaného experimentu [20].

Rozptyl – variance, je definován jako součet kvadratických odchylek od průměru dělený:

a) v *případě základního souboru*: počtem prvků základního souboru (populace). Pak rozptyl označujeme symbolem σ :

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$$

b) v *případě výběru*: počtem stupňů volnosti, který je roven počtu hodnot výběru zmenšenému o jedničku. Pak rozptyl označujeme symbolem s :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

V obou dvou případech (viz. a, b) je nutné znát tzv. *střední hodnotu*, která udává polohu těžiště rozdělení. Střední hodnota základního souboru se označuje symbolem μ , střední hodnota výběru symbolem \bar{x} . Matematicky je střední hodnota definována jako aritmetický průměr všech hodnot rozdělení:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Druhou odmocninou variance získáme hodnotu *střední kvadratické (směrodatné) odchylky*. Podobně jako u variance rozlišujeme střední kvadratickou odchylku pro základní soubor (σ) a střední kvadratickou odchylku pro výběr (s):

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2 \right)}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right)}$$

Směrodatná odchylka je nejčastěji používanou charakteristikou rozptylu v technické praxi. Hlavním důvodem je skutečnost, že její fyzikální rozměr je shodný s rozměrem sledované veličiny znaku. Z čistě statistického hlediska má však větší význam variance (rozptyl). Směrodatnou odchylku se doporučuje používat obecně jako míru rozptylu statistických výběrů. Její použití je obzvláště vhodné u větších výběrů, neboť na rozdíl od rozptylu

charakterizuje všechny hodnoty výběru. Naopak její použití není vhodné u souborů výrazně nesymetrických nebo obsahujících extrémně vzdálené (tzv. odlehlé) hodnoty [21].

Sledujeme-li pouze jeden *faktor* – tedy jednu proměnnou, hovoříme o tzv. *jedno-faktorové analýze rozptylu*. Někdy však potřebujeme sledovat vliv dvou a více faktorů, pak hovoříme o *dvou-faktorové* nebo *více-faktorové analýze rozptylu* [20].

Každý faktor může nabývat různých úrovní. Termín *úroveň* hovoří o specifické hodnotě nastavení faktoru v průběhu jeho experimentu [22]. Hlavním účelem analýzy rozptylu je tedy testování shody jednotlivých úrovní, nebo-li testování tzv. nulových hypotéz, kdy platí:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_i,$$

kde: μ_i ... skutečná (správná) hodnota výsledků hodnoceného parametru v *i-té* úrovni na *n* vzorcích.

$$\mu_i = \mu + \tau_i$$

kde: μ ... střední hodnota všech hodnot (při všech úrovních faktoru)
 τ_i ... tzv. efekt *i-té* úrovně.

V každém testu se uvažují dvě hypotézy: *nulová* (H_0) a *alternativní* (H_1). Nulovou hypotézou je myšleno původní tvrzení a často vychází z předchozího výzkumu nebo obecné znalosti. Alternativní hypotézou je potom tvrzení, o jehož pravdivosti se chceme přesvědčit.

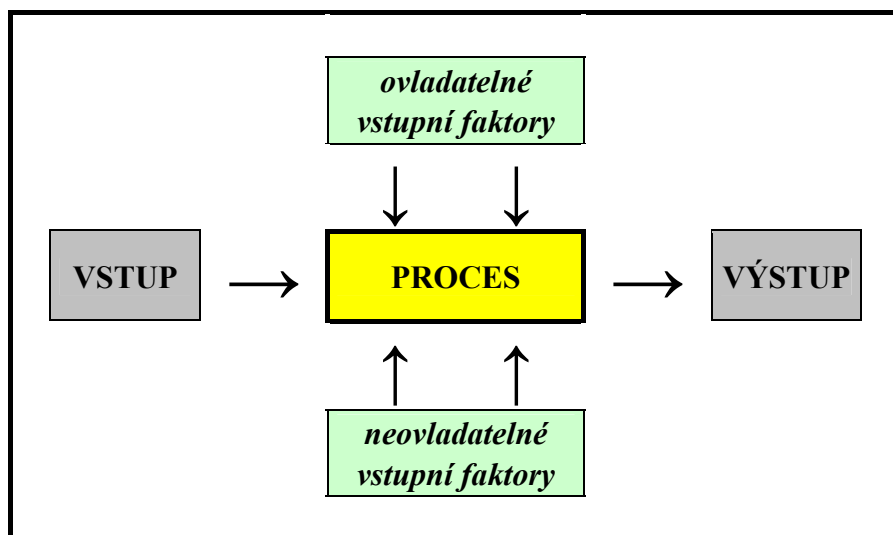
Závěry vyvozené z analýzy rozptylu platí pouze za předpokladu, že jednotlivé individuální hodnoty jsou adekvátně popsány některým ze statistických modelů (jedno-, dvou-, více-faktorové), které nám ANOVA nabízí a že chyby jsou nezávislé normálně rozdělené veličiny se známou střední hodnotou a s jistou konstantní, byť neznámou variací σ^2 . V praxi se nikdy nepodaří splnit tyto předpoklady naprosto exaktně, to však naštěstí není bezpodmínečně nutné. Jde o to, aby tyto předpoklady nebyly vážně narušeny [20].

2.3.1.2 DOE – Design of Experiments

Experimentování v praxi představuje testování kombinací různých hodnot (úrovní) faktorů, o nichž si myslíme, že mají vliv na odezvu (charakteristiku jakosti). Protože testování všech variant představuje velmi obsáhlý počet zkoušek, používají se pro experimentování zkrácené metody, které zkoumají pouze určitou frakci všech možných kombinací. DOE představuje postup, který redukuje nutný počet zkoušek a zároveň přináší mnoho dalších a velmi užitečných výhod.

Obecně DOE přináší tyto výhody:

- zlepšení výtěžnosti procesu
- zmenšení variability procesu
- snížení celkových nákladů
- redukcí doby vývoje nového produktu
- určení klíčových parametrů ovlivňujících výkonnost [23].



obr. 2.7: *Názorné schéma procesu*

Pod pojmem *proces*, který studujeme, si lze představit kombinaci strojů (zařízení), metod, lidí a dalších prostředků transformace vstupů (zpravidla materiálů nebo polotovarů) na nějaké výstupy – zpravidla nové polotovary nebo konečné výrobky, které lze klasifikovat prostřednictvím definovatelných či měřitelných výstupních parametrů nebo charakteristik. Proces má tzv. *ovladatelné faktory*, neboli parametry, které je možné (s jistou přesností) nastavit. Každý proces má však také *neovladatelné faktory* (tzv. šumové), které není možné buďto řídit vůbec nebo pouze omezeně (tzn. pouze po dobu experimentu). Nutno podotknout, že tzv. šumové faktory dosti negativně ovlivňují výslednou odezvu procesu.

Odezva je veličina, pomocí které vyjadřujeme výsledky experimentu, jako taková představuje výstupní závislou proměnnou (faktory představují nezávislé vstupní proměnné).

Plánovaným experimentem (DOE) se rozumí postupné vědomé nastavení vybraných říditelných vstupních parametrů (faktorů) a sledování vlivu nastavení těchto faktorů na vybrané výstupní parametry (odezvy). Schéma nastavení kombinace faktorů – tzv. plán experimentu je matematicky odvozen a je dokázáno, že pro daný případ umožňuje dosažení maximálního rozlišení případných významných faktorů a interakcí při minimálním počtu tzv. běhů, neboli pracovních cyklů. Odborníci na kvalitu využívají návrh experimentů k tomu, aby určili podmínky pro procesy a složky produktů, které mají vliv na kvalitu a aby pokud možno našli konfiguraci vstupních podmínek (faktorů) maximalizující výsledky [23].

Cíle plánovaného experimentu jsou:

- Stanovit vstupní proměnné parametry, které mají největší vliv na odezvy
- Určit nastavení ovladatelných vstupních parametrů tak, aby výstupní parametry dosáhly požadované hodnoty, nebo se jim alespoň přiblížily
- Určit nastavení ovladatelných vstupních parametrů tak, aby rozptyl výstupních parametrů byl co nejmenší, nebo alespoň přijatelně malý
- Určit nastavení ovladatelných vstupních parametrů tak, aby vliv neovladatelných vstupních faktorů byl co nejmenší [23].

Základní techniky používané při plánovaném experimentu:

- *Replikace* (replication) – jde o proces činnosti experimentálního měření v náhodném pořadí. Znamená opakování celého experimentu, nebo jen jeho části a to pod více než jednou podmínkou.
- *Uspořádání do bloků* (blocking) – jde o jednu z technik eliminace účinku vnějších změn vyvolaných existencí neovladatelných faktorů (koeficientů šumu). Jedná se o techniku výrazně zvyšující účinnost celého experimentu.
- *Znáhodnění* (randomization) – technika značně redukující účinek experimentálního zkreslení. Znáhodnění může zajistit to, že úrovně (specifické hodnoty) faktorů mají shodnou šanci být ovlivněny přítomností koeficientů šumu stejnou měrou [22].

Standardně používaný postup při použití DOE:

- 1) Definice nebo popis problému
- 2) Stanovení sledované proměnné – response
- 3) Výběr faktorů a úrovní
- 4) Výběr plánu experimentu
- 5) Provedení experimentu
- 6) Analýza dat (*)
- 7) Závěry a doporučení.

(*) Analýza výsledků experimentů spočívá především v nalezení kombinace faktorů, která dává nejlepší výsledek a dále v určení relativního podílu jednotlivých faktorů na jakosti výstupu. Vlastní analýza dat představuje poměrně rozsáhlé výpočty, zejména pokud jde o určení relativního podílu jednotlivých faktorů, kde používáme zejména statistické techniky ANOVA (analýza rozptylu) [23].

Často používané pojmy v DOE terminologii:

- *Plán experimentu* – plánem experimentu se rozumí tabulka, v jejímž prvním sloupci je uvedeno pořadové číslo běhu (experimentálního cyklu) a v následujících sloupcích jsou uvedeny kódované úrovně faktorů a interakce faktorů. Faktory se označují velkými písmeny latinské abecedy: A, B... nebo symboly X_1, X_2, \dots, X_n . V tabulce 2.8 je uveden příklad plánu na dvou úrovních faktorů. Podle počtu úrovní plánů mluvíme o plánech na dvou úrovních faktorů, třech úrovních faktorů, popřípadě o plánech na více úrovních faktorů. Existují i plány s různým počtem úrovní faktorů.
- *Interakce* – je kombinovaný účinek dvou faktorů, tzn. účinek jednoho faktoru je závislý na hodnotě nastavení druhého faktoru. Interakci dvou faktorů zapisujeme symbolicky jako: $A \times B$.
- *Faktory* – jsou ovladatelné vstupní veličiny procesu, jejichž vliv na vybrané výstupní parametry chceme prostřednictvím plánovaného experimentem sledovat.
- *Úroveň* – specifická hodnota nastavení faktoru v průběhu jeho experimentu.
- *Kódované úrovně faktorů* – v technice plánovaného experimentu téměř výhradně nepracujeme se skutečnými, nýbrž kódovanými úrovněmi faktorů. Kódování spočívá v přiřazení normovaných hodnot: např. -1, 0, +1 nebo 0, 1, 2 skutečným úrovním faktorů. Transformaci skutečných hodnot na kódované a opačně provedeme použitím následujících dvou vztahů [23]:

$$C_i = 2 \cdot \left(\frac{R_i - \bar{R}}{\Delta} \right)$$

$$R_i = \frac{C_i \Delta}{2} + \bar{R}$$

kde: C_i ... kódovaná hodnota faktoru

R_i ... skutečná hodnota faktoru

\bar{R} ... aritmetický průměr horní a dolní hodnoty parametru

Δ ... rozdíl mezi dolní a horní skutečnou hodnotou parametru.

Tabulka 2.8: *Příklad plánu na dvou úrovních faktorů*

Run	A	B	A×B
1	-1	-1	+1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1

A – kódovaná hodnota faktoru A

B – kódovaná hodnota faktoru B

A×B – dvoufaktorová interakce

Run – experimentální cyklus

Nejčastěji používanými plány v průmyslové praxi i ve vědě a výzkumu jsou bezesporu faktorové plány na dvou úrovních faktorů (viz. tab. 2.8). V některých případech však máme k dispozici data na třech úrovních faktorů (tzn., že každá vstupní veličina nabývá tří určitých hodnot), u kterých je možné sestavit plně i částečně faktorové plány, nicméně tyto se v praxi vůbec nepoužívají.

Je nutno podotknout, že existují *plány specializované přímo na směsi* (tzv. Mixture Design), v nichž faktory představují jednotlivé příměsi (komponenty), jejichž úrovně nejsou přirozeně nezávislé – jejich suma musí být vždy rovna jedné, neboli celku a zároveň platí, jednotlivé úrovně faktorů jsou svým způsobem závislé na ostatních úrovní faktorů. Máme-li například směs s p -příměsemi, můžeme pak faktory označit: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_p$. Platí však omezující podmínky: $0 \leq x_i \leq 1$ a zároveň musí být součet všech faktorových úrovní roven jedné: $x_1 + x_2 + \dots + x_p = 1$.

Plány typu simplex lattice – tyto plány slouží ke studiu vlivu komponent směsi na zvolenou závislou proměnnou, kterou může být například tlaková pevnost ztvrdlého betonu. Uvedené plány se označují symbolickým zápisem: $A \{p, m\}$, kde p označuje počet komponent směsi a m je počet intervalů dělení souřadnicových os tak, že na každé souřadnicové ose je $(m + 1)$ ekvidistantně rozmístěných bodů – tvoří se tzv. mřížka (lattice). Celkový počet bodů v těchto plánech (N) je dán vztahem: $N = \frac{(p + m - 1)!}{m! \cdot (p - 1)!}$. Každý takový bod pak představuje kombinaci

(cyklus, neboli „run“) jednotlivých faktorových úrovní, kdy pro každou úroveň x_i platí jednoduchý vztah: $x_i = 0, 1/m, 2/m, \dots, 1$. Nutno podotknout, že plán typu simplex lattice testuje všechny kombinace faktorových úrovní [23].

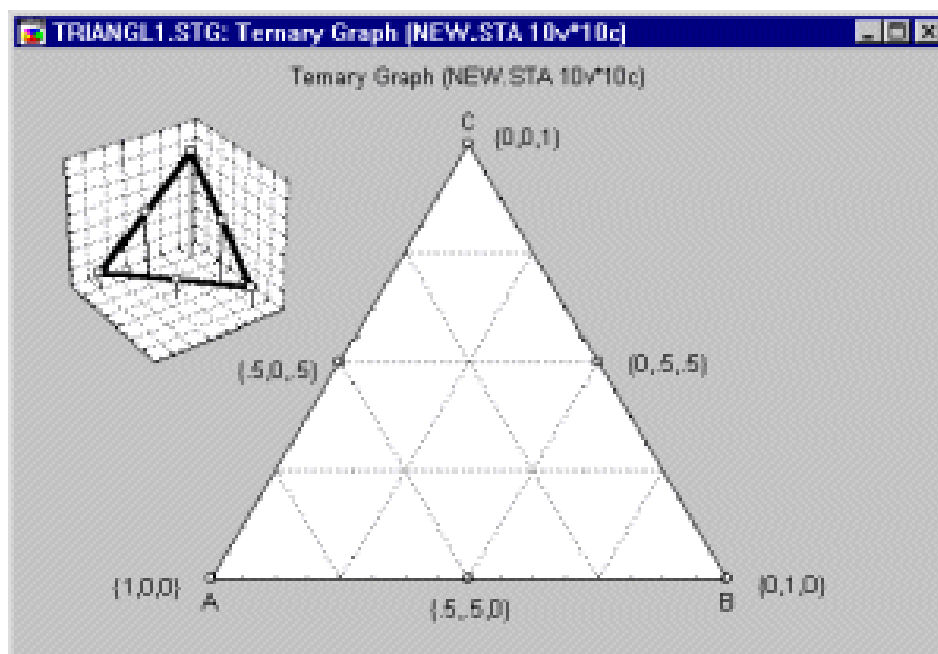
Názorný jednoduchý příklad pro pochopení předchozích vztahů: Plán typu simplex lattice je označen symbolickým zápisem: $A\{3, 2\}$, z čehož vyplývá, že „testovanou“ směs tvoří 3 komponenty (složky). Celkový počet bodů (cyklů experimentu) N bude: $N = \frac{(3+2-1)!}{2! \cdot (3-1)!} =$

$$\frac{4!}{2! \cdot 2!} = \frac{24}{4} = 6. \text{ Dosazením číselky 2 za proměnnou } m \text{ do vztahu: } x_i = 0, 1/m, 2/m, \dots, 1,$$

získáme určité hodnoty faktorových úrovní x_1, x_2, x_3 , které jsou: 0, 1/2, 1. Víme, že celkový počet bodů N představuje počet kombinací („runů“) těchto tří vypočtených hodnot faktorových úrovní. Nyní známe vše podstatné k tomu, abychom sestavili plán experimentu, reprezentovaný uvedenou tabulkou a obrázkem, který představuje schématické grafické znázornění plánu simplex lattice:

Tabulka 2.9: *Příklad plánu experimentu simplex lattice*

Run	X_1	X_2	X_3
1	0	0	1
2	0	0,5	0,5
3	0	1	0
4	0,5	0	0,5
5	0,5	0,5	0
6	1	0	0



obr. 2.8: *Schématické grafické znázornění plánu simplex lattice $A\{3,2\}$*

Body ve vrcholech trojúhelníku reprezentují čisté složky směsi, kdežto body ležící ve středech stran, reprezentují binární směs. Prostor uvnitř trojúhelníku i včetně jeho hran se nazývá „experimentální doména“.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Použitý materiál

- **Cement:** Aalborg White (CEM I 52,5 R; Dánsko)
- **Superplastifikátor:** Glenium ACE 40 (SKW-MBT Stavební hmoty s.r.o.)
– jedná se o SP ze skupiny polykarboxylátů
- **Příměsi:**
Mikrosilika Elkem Grade 971-U (Elkem materials, Norsko)

Vysokopecní struska SMŠ 420 VP-6 (VPS, $d_{10} = 1,36$; $d_{50} = 8,79$; $d_{90} = 22,95$)

Speciálně upravený křemen (SUK, $d_{10} = 2,62$; $d_{50} = 24$; $d_{90} = 76,62$)
- **Kamenivo a mikrokamenivo:**
Kalcinovaný bauxit (frakce 0 až 1 mm, Bode-Panzer s.r.o)

3.2 Přístroje a zařízení

- Zařízení pro měření pevnosti v tlaku – tlakový lis
- Zařízení pro měření pevnosti v tahu za ohybu – Michaelisův přístroj

3.3 Postup přípravy zkušebních vzorků směsí

Příprava vzorků směsí (výroba trámců) probíhala takto:

- Nejprve byla navážena potřebná množství jednotlivých složek, kterých bylo zapotřebí pro přípravu zvolené záměsi.
- Poté byly komponenty s velkým měrným povrchem vloženy do míchačky, jednalo se především o *cement* (tedy hlavní pojivo), *křemičité úlety*, *vysokopecní strusku* (VPS) a *speciálně upravený křemen* (SUK).
- Předem odvážené množství superplastifikátoru Glenium ACE 40 (vždy 25 g) bylo smícháno s určitým množstvím vody a takto připravený roztok byl přidán do míchačky. Teprve nyní bylo spuštěno pomalé míchání a v něm pokračováno po dobu 5 minut, za tento čas se daná směs použitých komponent dostatečně promíchala a do jisté míry i homogenizovala.

- Po uplynutí 5 minut potřebných k homogenizaci směsi, bylo dle potřeby přidáváno další množství vody a to pouze po velmi malých dávkách (max. 5 g), aby nedošlo k „přesycení“ směsi vodou, čímž by vzniklá směs utrpěla na kvalitě. Postupnými přídávky vody došlo k vytvoření pasty žádané konzistence.
- Do takto připravené homogenní hmoty (pasty) byla přidána poslední složka v podobě kameniva, kterou představovala *frakce kalcinovaného bauxitu* o velikosti zrna 0 až 1 mm.
- Vzniklá směs byla ponechána po dobu 2 minut v míchačce k důkladnému promíchání.
- Míchání bylo poté zastaveno a směs byla za současného vibrování na vibračním stole plněna do forem o rozměrech 40×40×160 mm. Tímto bylo docíleno zhutnění materiálu a snížení obsahu pórů v cementovém kompozitu.
- Po dokončení vibrování, byla již plná forma sejmuta z vibračního stolu a následně vložena do polyetylenového (PE) sáčku, v němž byla ponechána po dobu 24 hodin.
- Po uplynutí těchto 24 hodin (následující den) byla forma s betonem vyjmuta z PE sáčku a rozebrána. Vyrobené trávce o rozměrech 40×40×160 mm uloženy do vlhkého uložení.
- Po uplynutí sedmi dnů, byly trávce z vlhkého uložení vyjmuty z důvodu provedení sedmidenních zkoušek pevnosti (pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu). Zbylé trávce byly ponechány ve vlhkém uložení po dobu 28 dnů, poté vyjmuty a taktéž podrobeny pevnostním zkouškám.

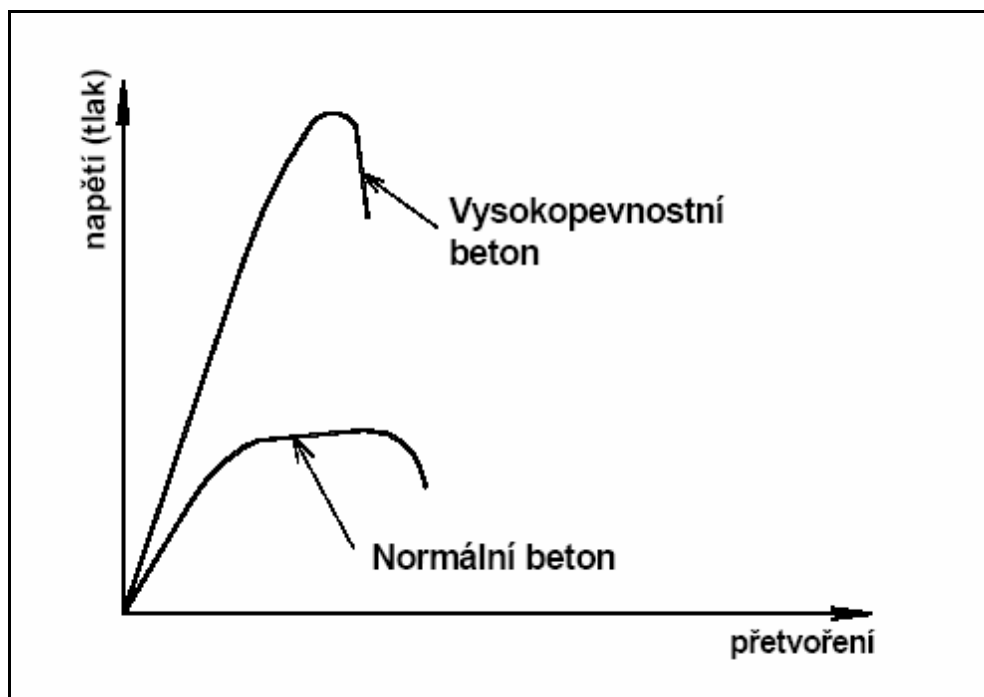
3.4 Stanovení pevností připravených vzorků

Mechanické vlastnosti materiálů jsou velmi často rozhodujícím faktorem pro jejich použití v praxi. Kompozity na bázi portlandského cementu (zejména HPC, HSC) se většinou chovají jako materiály křehké. To znamená, že se na rozdíl od kovu až do svého porušení deformují pouze pružně a tedy plastická deformace je zanedbatelná (viz. obr. 3.1). Obecně lze pružnou deformaci křehkého tělesa v celém rozsahu pevnosti, například při namáhání v tahu, vyjádřit Hookovým zákonem: $\sigma = E \cdot \varepsilon$, kde: σ ... působící napětí [Pa]

E ... Youngův modul pružnosti v tahu [Pa]

ε ... relativní deformace, kterou lze vyjádřit vztahem:

$\varepsilon = \Delta l / l$, nebo-li poměrem prodloužení k původní délce tělesa [24].



obr. 3.1: Pracovní diagram vysokopevnostního a normálního betonu

Po překročení mezního napětí se těleso z křehkého materiálu náhle poruší tzv. *křehkým lomem*. Počátek a rozvoj křehkého lomu nejsou jednoduché děje, jejichž průběh závisí nejen na typu materiálu, ale také na jeho mikrostruktuře, přítomnosti trhlin, tvaru zkušebních těles, teplotě, rychlosti zatěžování atd. [24]

3.4.1 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla stanovována na předem vyrobených betonových trámciích o již zmíněných rozměrech 40×40×160 mm. K tomuto účelu bylo využito zařízení pro měření pevnosti v tahu za ohybu, nebo-li tzv. Michaelisova přístroje s brokovou zátěží (viz. obr. 3.2). Každý zkušební trámec byl pozvolna zatěžován (přisypáváním broků) až do jeho destrukce.

Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu – tzv. „lámací mechanismus“ se sestává ze tří válcových opěr o průměru 10 mm (tři působící body). Dvě z nich, které jsou od sebe vzdáleny $(100 \pm 0,5)$ mm, působí na zkušební trámec zespodu a třetí, která je umístěna přesně v polovině vzdálenosti spodních dvou opěr, působí naopak shora (viz. obr. 3.3).

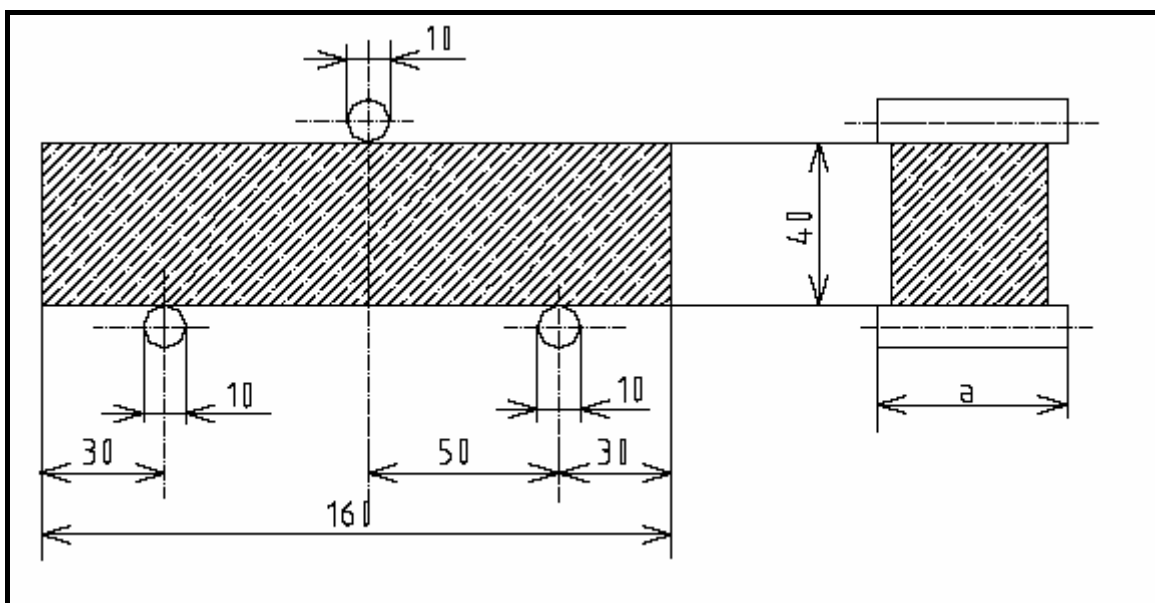
Zkoušený trámec se umístí bočními plochami (ty mají díky formě „zachované rozměry“) na opěry a postupným zatěžováním (přisypáváním broků) se provede zkouška pevnosti v tahu za ohybu, tato je dokončena ve chvíli, kdy se trámec přelomí – nastane lom. V okamžiku lomu na trámec působí síla (větší než $50 \text{ N} \cdot \text{s}^{-1}$) vyvinutá nádobou s broky o určité celkové hmotnosti [kg]. Pro zjištění pevnosti v pascálech [$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 \Rightarrow 1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$] ze síly vyjádřené určitou hmotností nádoby s broky, lze použít následující přepočít – platí pouze pro tránce o výše uvedených rozměrech [25]:

$$\sigma_{OHYB} = 1,15 \cdot m_n$$

kde: σ_{OHYB} ... je stanovená pevnost v tahu za ohybu v [MPa],
 m_n ... je celková hmotnost nádoby s broky [kg].



obr. 3.2: Zařízení pro měření pevnosti v tahu za ohybu (Michaelisův přístroj)



obr. 3.3: Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu [26].

3.4.2 Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku připravených betonových kompozitů byla zjišťována na zkušebních trámcích o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm a sice prostřednictvím zařízení zvané tlakový lis (viz. obr. 3.4). Trámce byly pozvolna zatěžovány až do jejich úplného rozrušení.

Tlakový lis se sestává ze dvou ocelových ploch, mezi které se vkládá „stativ“ (viz. obr. 3.5), který slouží k uchycení měřeného vzorku (trámce) betonu. Stativ je také tvořen dvěma ocelovými částmi (plochami), z nichž spodní je ta nepohyblivá a vrchní naopak ta pohyblivá.

Na spodní část vkládáme bočními plochami vzorek a dotažením vrchní pohyblivé části jej upevníme. Mezi oběma plochami stativu by v klidové poloze měla být vzdálenost (mezera) 45 mm, každá z obou ploch je čtvercového tvaru s délkou strany $(62,5 \pm 0,1)$ mm a tedy lisovací plochou $39,1 \text{ cm}^2$. Přístroj je schopen působit na vzorek silou v rozmezí od 20 do 600 kN.

Trámce, které byly předem zlomeny při určování pevnosti v tlaku za ohybu na Michaelisově přístroji, byly poté použity na stanovení pevnosti v tlaku. Po kontrole uložení trámců a nastavení přístroje může započít vlastní zkouška pevnosti v tlaku. Vzorky jsou pozvolna zatěžovány, kdy na začátku měření je nárůst síly působící na plochu vzorku rychlejší, po velmi krátké době se však zpomalí. Celá zkouška by neměla trvat méně než 10 s. Pro zjištění pevnosti v pascálech [$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 \Rightarrow 1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$] ze síly vyjádřené v kilonewtonech [kN], lze použít následující přepočít (platí pouze pro trámce o rozměrech $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$) [25]:

$$\sigma_{TLAK} = F_T \cdot 0,4$$

kde:

σ_{TLAK} ... je stanovená pevnost v tlaku v [MPa],

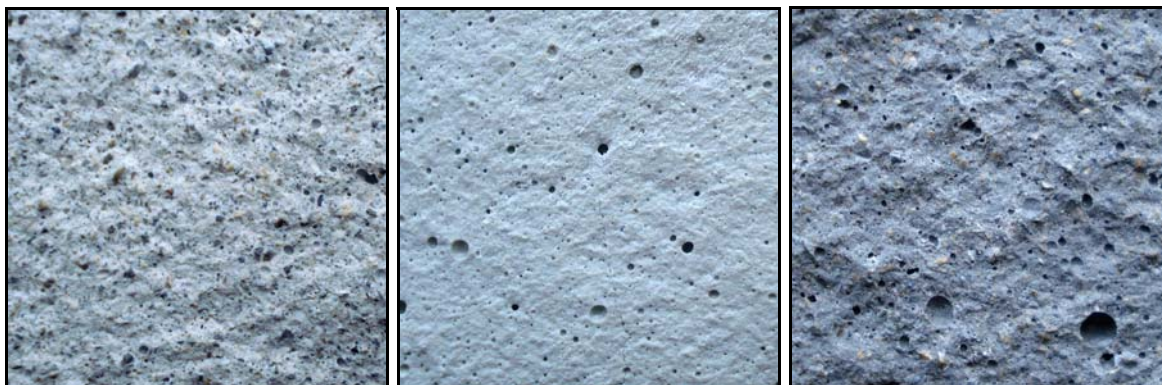
F_T ... tlaková síla působící na plochu vzorku v [kN].



obr. 3.4: Zařízení pro měření pevnosti v tlaku (tlakový lis)



obr. 3.5: „Stativ“ pro uložení vzorku v tlakovém lisu



obr. 3.6: Ukázka lomových ploch trámů (záměsi čísla 21., 23. a 12.), vzniklých po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu na Michaelisově přístroji

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

4.1 Složení všech připravených záměsí

Tabulka 4.1: Složení záměsí s dostatečnou zpracovatelností seřazených dle vzestupné tendence hodnot vodního součinitele

záměs	AW [g]	SF [g]	B [g]	SUK [g]	VPS [g]	SP [g]	H ₂ O [g]	w/(c+p)
1.	750	150	500	–	–	25	110	0,122
2.	750	300	–	–	–	25	130	0,124
3.	750	300	–	300	300	25	205	0,124
4.	750	300	500	300	300	25	215	0,130
5.	750	225	500	–	–	25	130	0,133
6.	750	300	500	150	150	25	180	0,133
7.	750	300	500	300	300	25	220	0,133
8.	750	300	1050	–	–	25	146	0,139
9.	750	300	1050	150	150	25	189	0,140
10.	750	150	500	150	–	25	147,5	0,140
11.	750	300	1050	–	–	25	148	0,141
12.	750	300	500	–	–	25	148	0,141
13.	750	150	–	150	150	25	169,5	0,141
14.	750	250	1050	–	150	25	164	0,143
15.	750	150	–	–	–	25	128,5	0,143
16.	750	300	1050	150	–	25	171,5	0,143
17.	750	300	1050	–	150	25	176	0,147
18.	750	300	1050	–	275	25	195	0,147
19.	750	–	–	300	–	25	173	0,165
20.	750	300	1050	275	–	25	230	0,174
21.	750	–	500	150	–	25	172	0,191
22.	750	–	500	–	150	25	175	0,194
23.	750	–	–	–	300	25	207	0,197
24.	750	–	500	–	–	25	176,5	0,235
25.	1000	–	–	–	–	–	346,5	0,347

Tabulka 4.2: Složení záměsí s nedostatečnou zpracovatelností

AW [g]	SF [g]	B [g]	SUK [g]	VPS [g]	SP [g]	H ₂ O [g]
750	150	1050	–	–	25	110 ↑
750	–	1050	300	300	25	175 ↑
750	–	500	150	150	25	145 ↑
750	–	500	300	300	25	155 ↑

Uvedená množství vody u každé ze záměsí s nedostatečnou zpracovatelností (viz. Tab. 4.2 na straně 37) nebyla konečná (viz. značení ↑). Mnoha dalšími přísadami však nebylo dosaženo dostatečné zpracovatelnosti těchto záměsí.

4.2 Výsledky z měření pevností jednotlivých záměsí

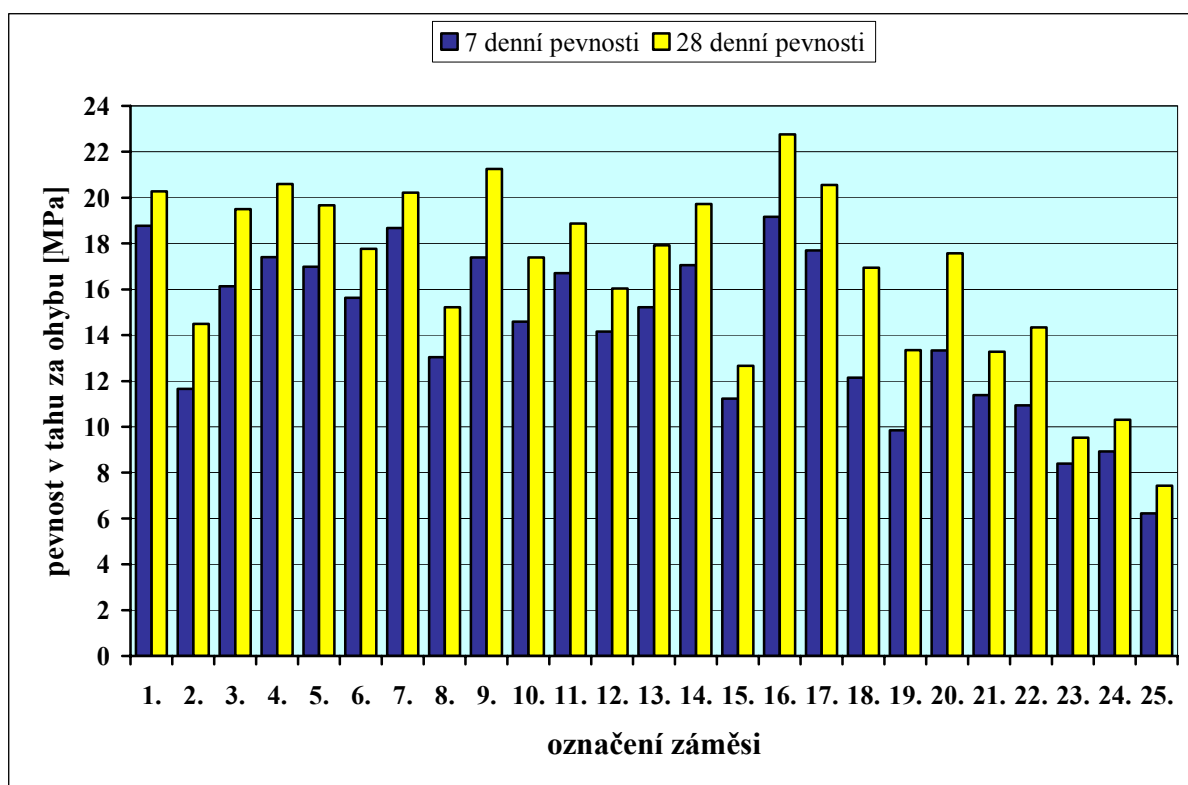
Tabulka 4.3: *Hodnoty naměřených pevností jednotlivých vzorků záměsí*

vzorek záměsí	7 denní pevnosti [MPa]		28 denní pevnosti [MPa]	
	v tlaku	v tahu za ohybu	v tlaku	v tahu za ohybu
1.	145,4	18,77	164,1	20,27
2.	122,9	11,66	140,6	14,48
3.	132,5	16,13	146,9	19,50
4.	119,8	17,41	139,2	20,60
5.	136,0	16,98	146,8	19,66
6.	110,9	15,63	133,7	17,77
7.	116,2	18,67	138,5	20,23
8.	170,0	13,04	193,5	15,21
9.	128,4	17,39	145,1	21,26
10.	125,1	14,59	141,3	17,39
11.	139,3	16,70	153,4	18,87
12.	111,5	14,15	123,1	16,03
13.	134,7	15,22	147,5	17,92
14.	143,6	17,05	168,4	19,72
15.	118,9	11,23	132,1	12,66
16.	158,8	19,16	160,3	22,76
17.	140,0	17,69	161,5	20,55
18.	93,5	12,15	138,8	16,95
19.	81,8	9,84	102,4	13,34
20.	97,6	13,33	131,1	17,57
21.	105,8	11,38	125,2	13,28
22.	112,2	10,94	123,2	14,34
23.	104,4	8,40	123,4	9,53
24.	76,4	8,92	98,5	10,31
25.	71,5	6,22	92,0	7,43

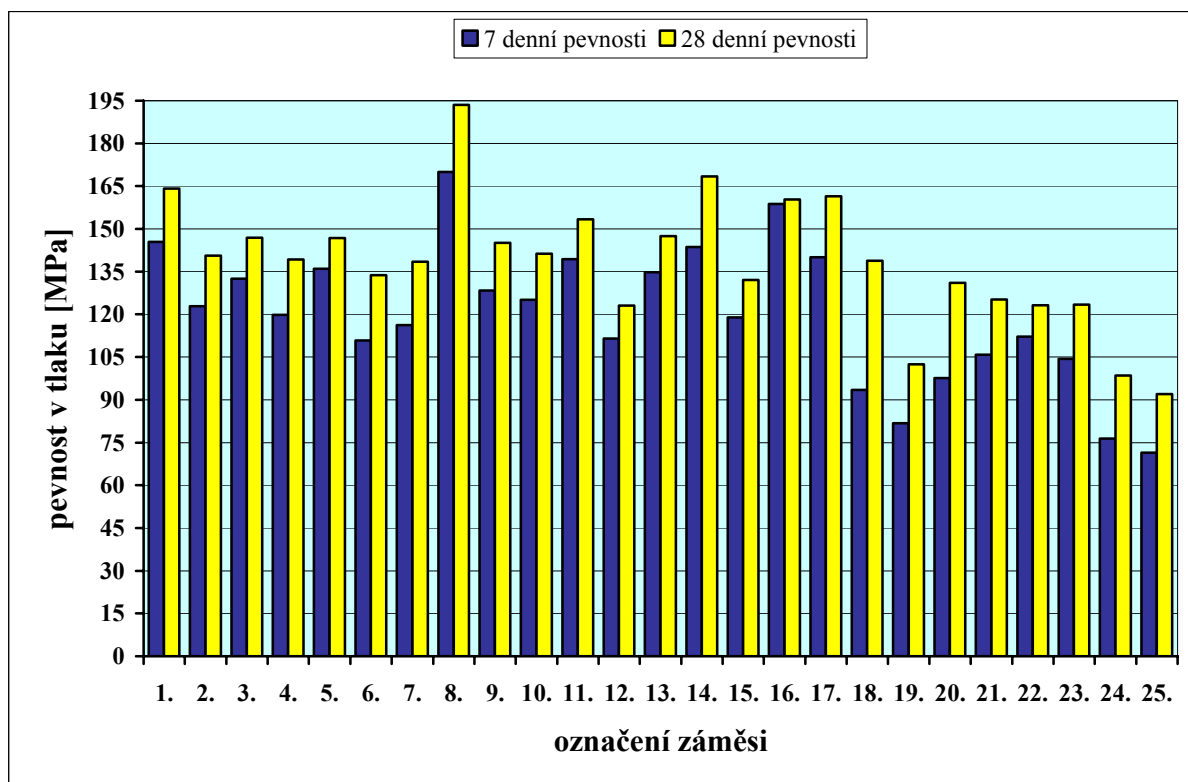
Z uvedené tabulky je patrné, že se naměřené hodnoty pevností v tlaku po 7 dnech vlhkého uložení pohybovaly v rozmezí od 72 do 170 MPa, po 28 dnech uložení se tyto pohybovaly v rozmezí od 92 do 194 MPa. V případě naměřených pevností v tahu za ohybu po 7 dnech uložení se naměřené hodnoty pohybovaly v rozmezí od 6 do 19 MPa, po 28 dnech vlhkého

uložení pak od 7 do 23 MPa. Nejvyšších hodnot pevností bylo dosaženo u záměsí číslo 8. a 16. Pro lepší orientaci v tabulce 4.3 (strana 38) jsou hodnoty nejvyšších pevností zvýrazněny.

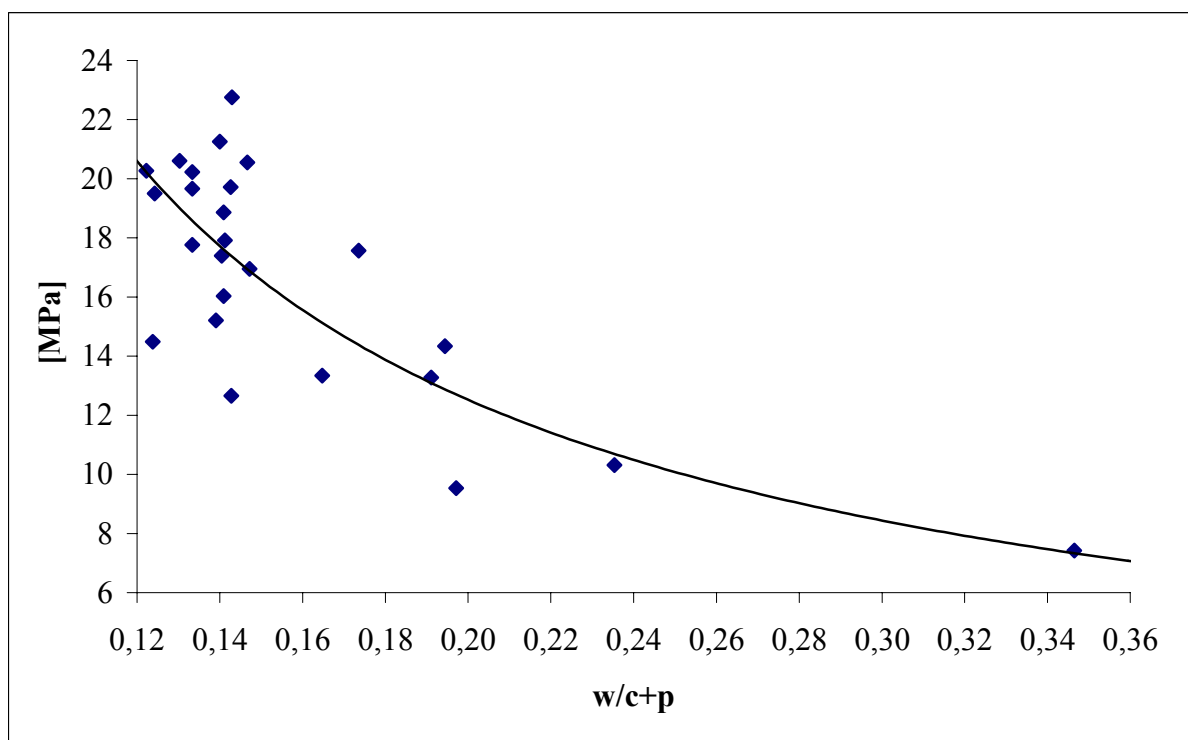
V případě záměsí 2., 19., 23. a 24., se vždy jedná o kombinaci cementu s jednou ze čtyř použitých složek (SF, B, SUK, VPS). Bylo zjištěno, že dochází ke zvyšování hodnot tlakových pevností v pořadí: $B < SUK < VPS < SF$, což v praxi znamená, že kombinací samotného cementu s kalcinovaným bauxitem dosáhneme nižších hodnot tlakových pevností, než v případě kombinace cementu s křemičitými úlety. V případě hodnot pevností v tahu za ohybu se pořadí vlivu jednotlivých komponent na výsledné pevnosti nepatrně mění: $VPS < B < SUK < SF$. Z výsledků vyplývá, že použití vysokopecní granulované strusky nebylo zdaleka dosaženo takových hodnot pevností v tahu za ohybu, jako v případě záměsí tvořené cementem a křemičitými úlety.



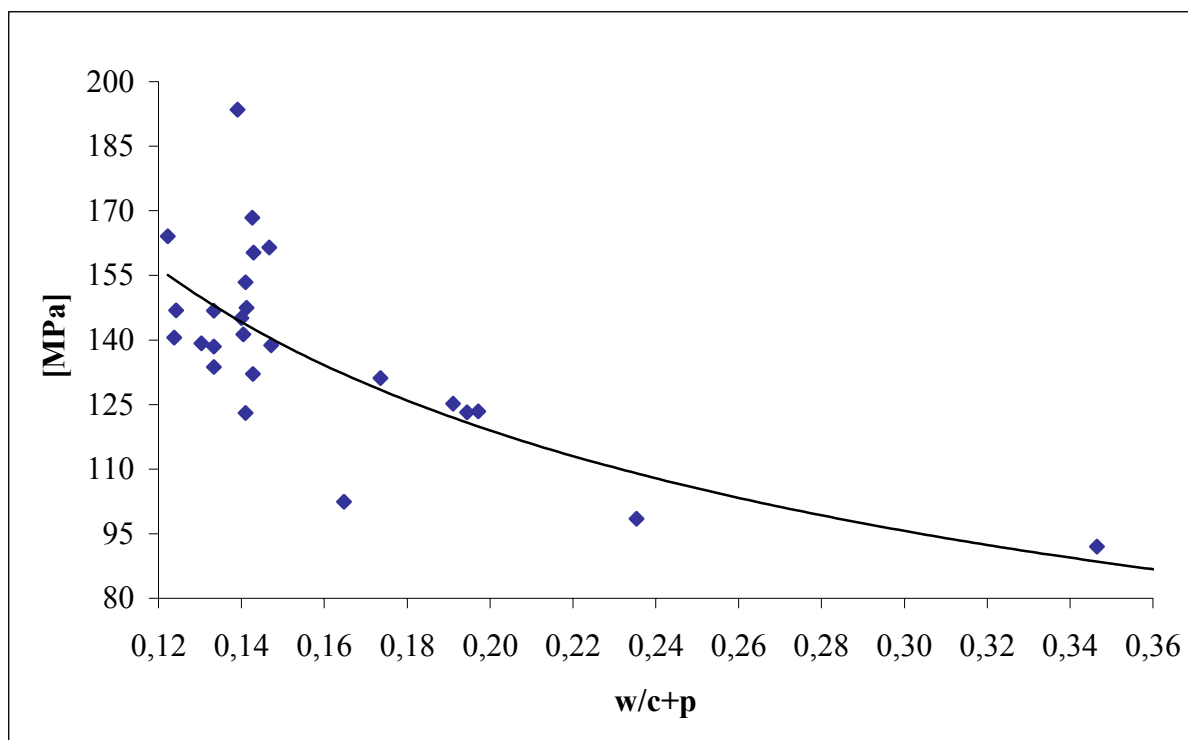
Graf 1: Porovnání naměřených hodnot pevností v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech vlhkého uložení vzorků záměsí



Graf 2: Porovnání naměřených hodnot pevností v tlaku po 7 a 28 dnech vlhkého uložení vzorků záměsí



Graf 3: Závislost 28 denních pevností v tlaku na ohybu na vzrůstající hodnotě vodního součinitele



Graf 4: *Závislost 28 denních pevností v tlaku na vzrůstající hodnotě vodního součinitele*

Grafy č. 3 a 4 byly proloženy spojnicí trendu mocninného typu. Uvedená závislost je ve shodě s obr. 2.2 (viz. str. 9), který graficky znázorňuje doporučenou závislost mezi vodním součinitelem a pevností v tlaku [1].

4.3 Charakterizace záměsí podle obsahu a vlivu jednotlivých složek

Podíl použitého cementu Aalborg White v záměsích se pohyboval v rozmezí od 29 do 74 hm. % (viz. Tab. 4.4 na straně 42). Jelikož nejvyšší hodnoty pevností v tlaku i v tahu za ohybu byly naměřeny u záměsí 8. a 16., ukazuje se, že optimální použité množství cementu z celkové hmotnosti záměsí se pro dosažení, pokud možno co nejlepších mechanických vlastností, pohybuje v rozmezí od 31 do 33 hm. % a to nejlépe s použitím kalcinovaného bauxitu jako kameniva a křemičitých útětů (mikrosiliky) jako plniva.

Podíl použité mikrosiliky v záměsích se pohyboval v rozmezí od 9 do 25 hm. %. Nejlepší dávkování pro tuto složku, při kterém je dosaženo nejlepších mechanických vlastností HPC, se pohybuje v rozmezí 10 – 14 % z celkové hmotnosti záměsí.

Množství kalcinovaného bauxitu, jakožto složky plnící v záměsí funkci kameniva, se pohybovalo v rozmezí od 21 do 46 hm. %. Zcela nejlepších mechanických vlastností v případě HPC bylo dosaženo použitím bauxitu jako kameniva do směsí tvořených cementem a mikrosilikou a to při množství bauxitu odpovídajícím 43 a 46 % z celkové hmotnosti záměsí.

Vysokopepní granulovaná (VPS) struska a velmi jemně mletý křemen (SUK) slouží ve vysokohodnotných betonech spíše jako náhrada cementu, jejich procentuální zastoupení v záměsích se pohybovala v rozmezí od 6 až do 24 hm. %. Vyšší procentuální zastoupení obou těchto složek ve vysokohodnotných betonech se jeví spíše jako nežádoucí, dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Naopak spíše nižší použitá množství vedou k lepším mechanickým vlastnostem betonových kompozitů. Například přídatkem 6 hm. % SUK v případě záměsí 16. bylo dosaženo vůbec největších pevností v tahu za ohybu a to jak po 7, tak

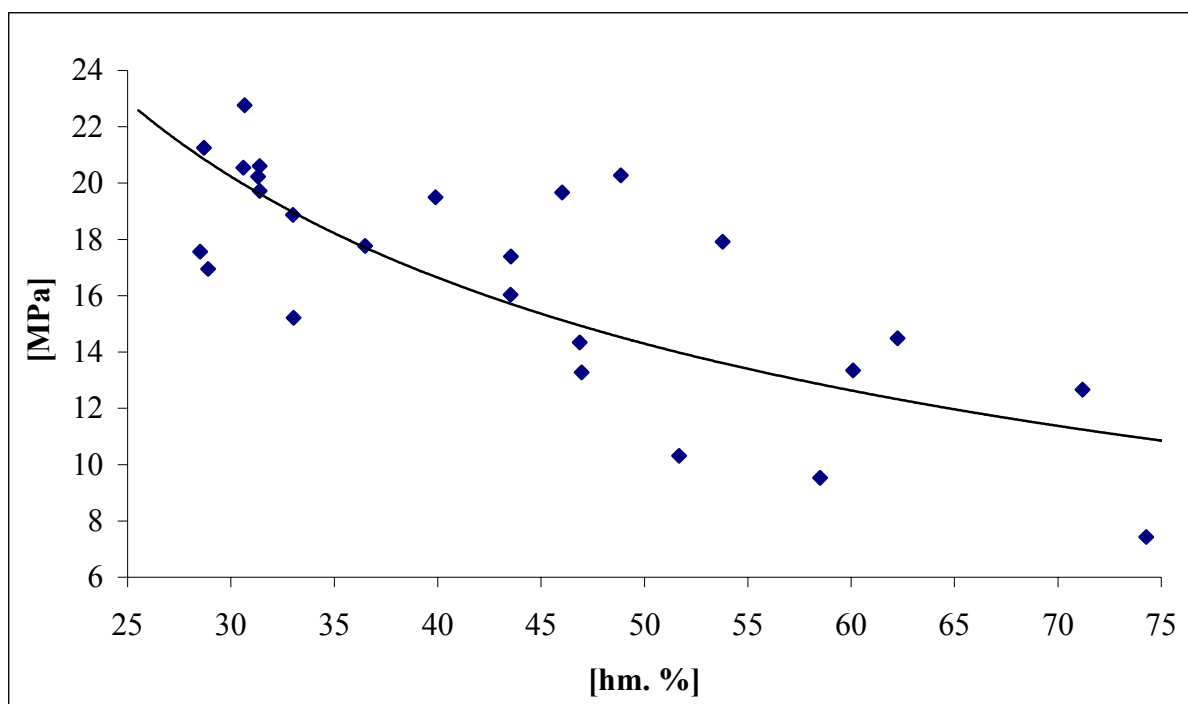
i po 28 dnech. Jako velmi přínosné se jeví společné použití obou těchto složek – SUK a VPS a to v případě jejich shodného zastoupení v dané záměsi.

Pokud bychom tedy hledali beton s co nejlepšími mechanickými vlastnostmi, lze podle experimentálně stanovených výsledků říci, že nejlepších hodnot pevností je možné dosáhnout kombinací cementu s mikrosilikou a bauxitem, s minimálním množstvím dalších složek.

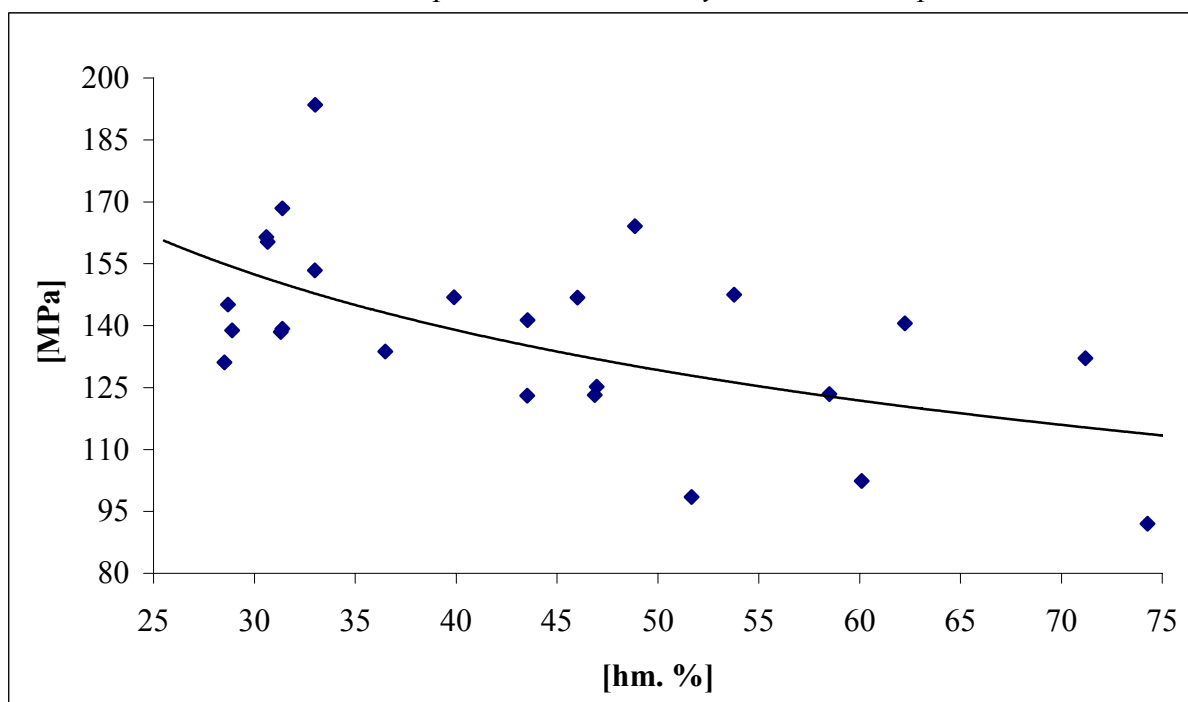
Tabulka 4.4: Podíl složek z celkové hmotnosti dané záměsi

záměs	w/(c+p)	hmotnost záměsi [g]	podíl dané složky [hm. %]				
			B	AW	SF	SUK	VPS
1.	0,122	1535,0	32,57	48,86	9,77	–	–
2.	0,124	1205,0	–	62,24	24,90	–	–
3.	0,124	1880,0	–	39,89	15,96	15,96	15,96
4.	0,130	2390,0	20,92	31,38	12,55	12,55	12,55
5.	0,133	1630,0	30,67	46,01	13,80	–	–
6.	0,133	2055,0	24,33	36,50	14,60	7,30	7,30
7.	0,133	2395,0	20,88	31,32	12,53	12,53	12,53
8.	0,139	2271,0	46,24	33,03	13,21	–	–
9.	0,140	2614,0	40,17	28,69	11,48	5,74	5,74
10.	0,140	1722,5	29,03	43,54	8,71	8,71	–
11.	0,141	2273,0	46,19	33,00	13,20	–	–
12.	0,141	1723,0	29,02	43,53	17,41	–	–
13.	0,141	1394,5	–	53,78	10,76	10,76	10,76
14.	0,143	2389,0	43,95	31,39	10,46	–	6,28
15.	0,143	1053,5	–	71,19	14,24	–	–
16.	0,143	2446,5	42,92	30,66	12,26	6,13	–
17.	0,147	2451,0	42,84	30,60	12,24	–	6,12
18.	0,147	2595,0	40,46	28,90	11,56	–	10,60
19.	0,165	1248,0	–	60,10	–	24,04	–
20.	0,174	2630,0	39,92	28,52	11,41	10,46	–
21.	0,191	1597,0	31,31	46,96	–	9,39	–
22.	0,194	1600,0	31,25	46,88	–	–	9,38
23.	0,197	1282,0	–	58,50	–	–	23,40
24.	0,235	1451,5	34,45	51,67	–	–	–
25.	0,347	1346,5	–	74,27	–	–	–

4.3.1 Vliv podílu cementu na mechanické vlastnosti HPC



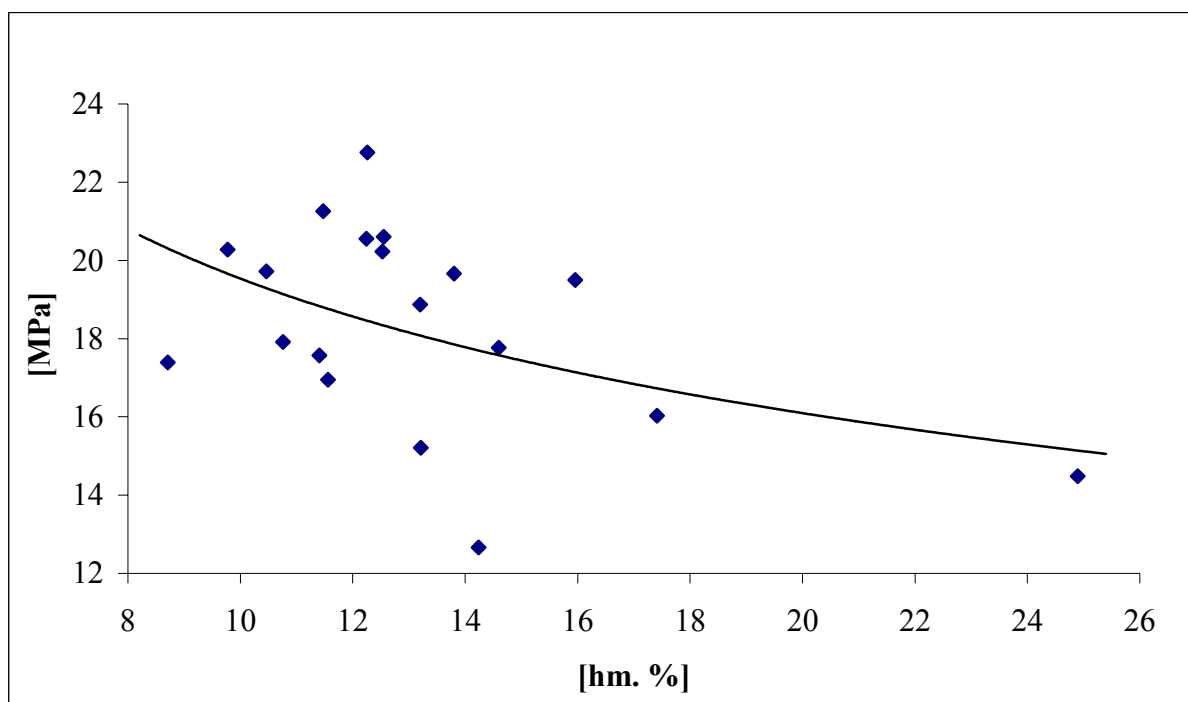
Graf 5: Závislost 28 denních pevností v tahu za ohybu na množství použitého cementu



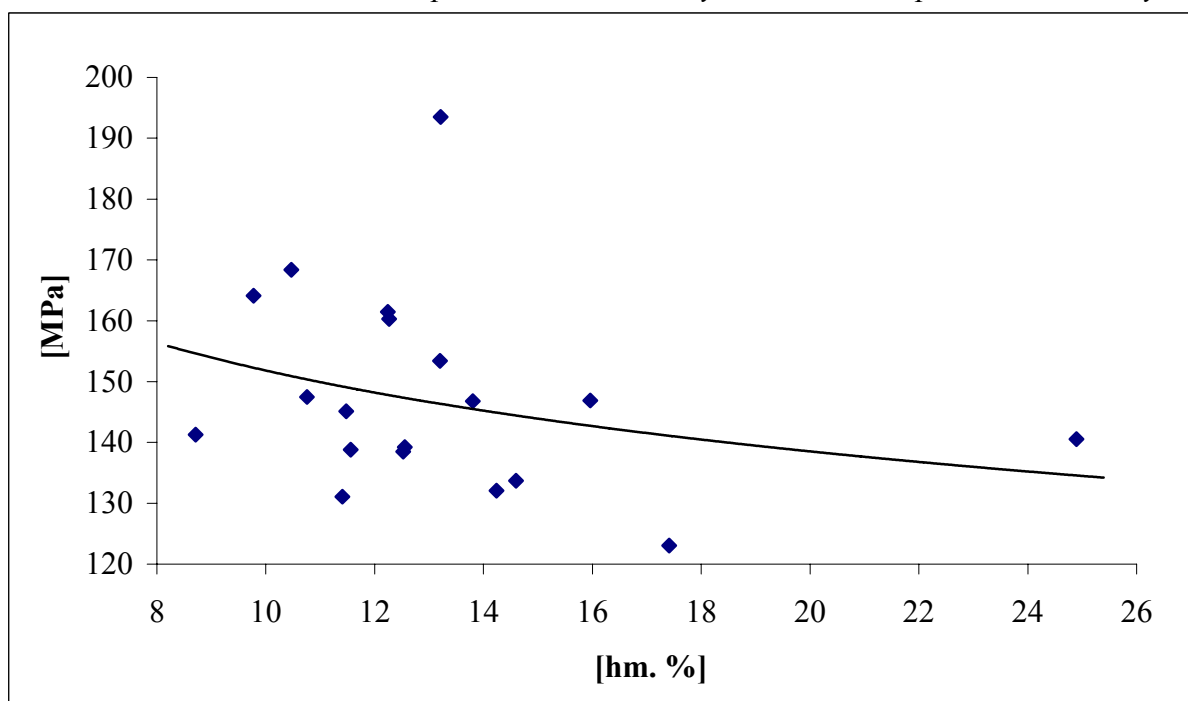
Graf 6: Závislost 28 denních pevností v tlaku na množství použitého cementu

Z obou uvedených grafů je patrné, že s přibývajícím množstvím cementu se zhoršují mechanické vlastnosti připravených vzorků HPC, zejména pak sledované pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Pro dosažení pokud možno co nejlepších mechanických vlastností bylo zjištěno, že by se optimální množství použitého cementu mělo pohybovat v rozmezí od 31 do 33 % z celkové hmotnosti záměsi. Právě v tomto intervalu bylo dosaženo nejlepších mechanických vlastností připravených vzorků HPC.

4.3.2 Vliv podílu mikrosiliky na mechanické vlastnosti HPC



Graf 7: Závislost 28 denních pevností v tahu za ohybu na množství použité mikrosiliky



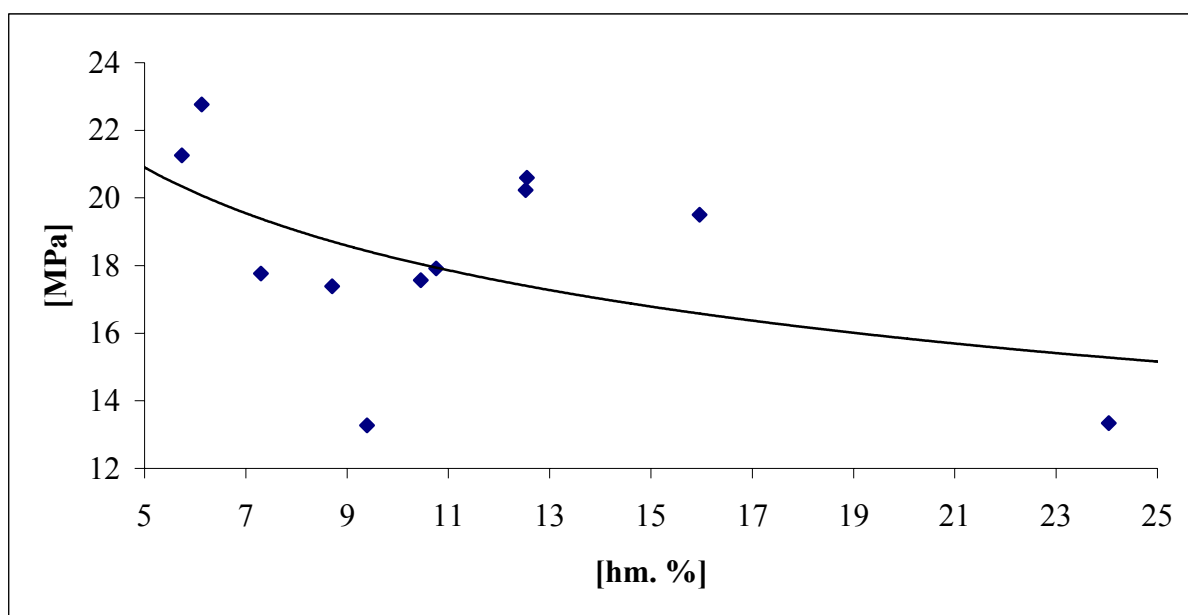
Graf 8: Závislost 28 denních pevností v tlaku na množství použité mikrosiliky

Jak již bylo v textu uvedeno, podíl použité mikrosiliky v záměsích se pohyboval v rozmezí od 9 do 25 hm. %. Bylo zjištěno, že nejlepší dávkování pro tuto složku, při kterém je dosaženo nejlepších mechanických vlastností HPC, se pohybuje v rozmezí 10 – 14 % z celkové hmotnosti záměsi. Z grafů č. 7 a 8, ve kterých zjištěné hodnoty vykazují značný rozptyl od navržené spojnice trendu mocninného typu, je patrné, že při vyšších podílech mikrosiliky obsažené ve vzorcích HPC, klesají hodnoty měřených pevností v tlaku a v tahu za

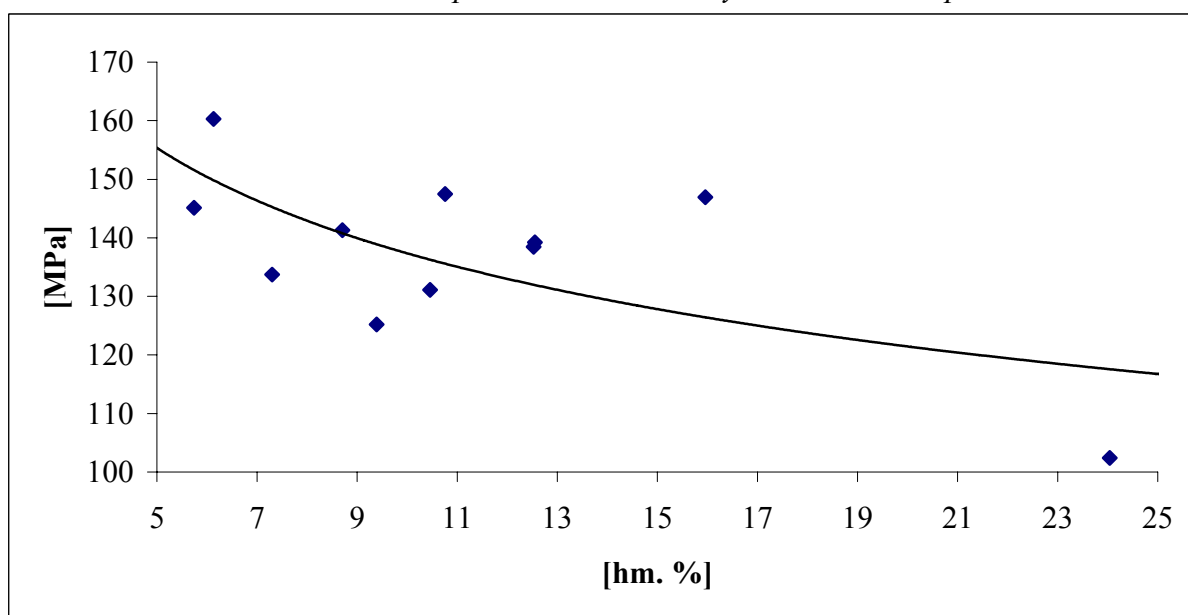
ohybu. Nutno podotknout, že právě vyšší podíly mikrosiliky v záměsích zlepšily jejich zpracovatelnost – tzn. směsi vykazovaly lepší reologické chování (vlastnosti). Dané chování lze teoreticky vysvětlit tím, že tyto extrémně malé částičky křemičitých úletů s velkým měrným povrchem, vytěsňují vodu z mezer mezi zrny cementu a tak roste podíl vody pro ztekucení betonové směsi.

Po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu na trámcích betonových kompozitů, které obsahovaly mikrosiliku, byl již pouhým okem patrný rozdíl v mikrostruktuře lomu tranzitní zóny v porovnání se vzorky, které mikrosiliku neobsahovaly. Zejména pak vyššími podíly křemičitých úletů ve směsi bylo dosaženo velmi kompaktní mikrostruktury, neboť tyto velmi malé částice sehrály roli plniva, kdy vyplnily mezery mezi jednotlivými zrny cementu a kamenivem v podobě použitého bauxitu.

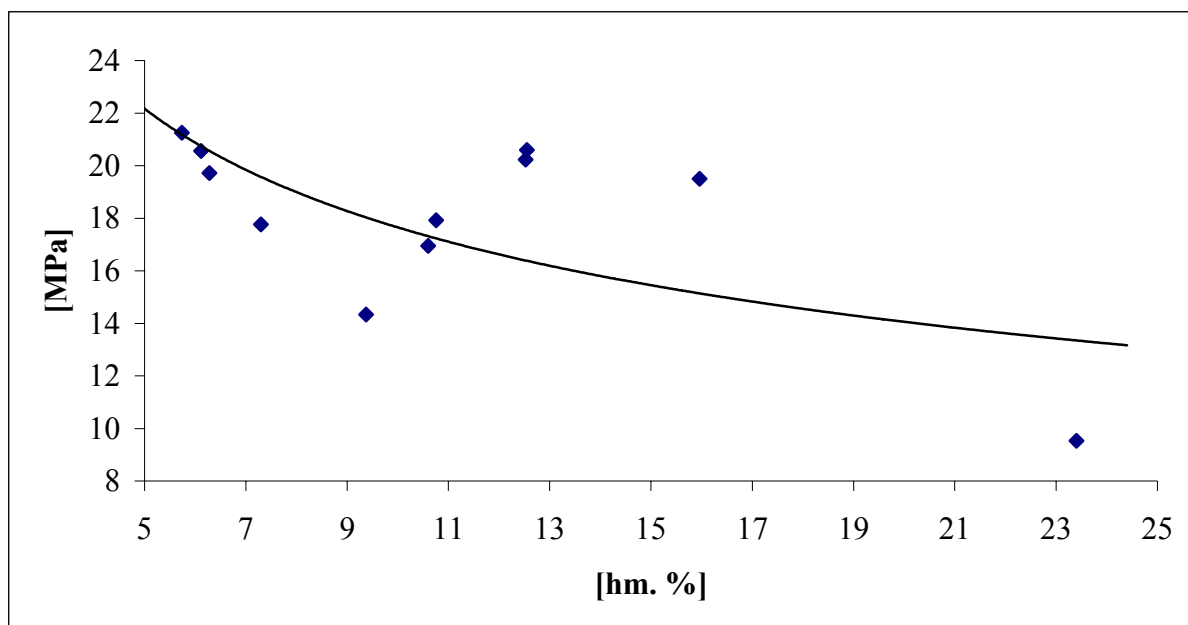
4.3.3 Vliv podílu SUK a VPS na mechanické vlastnosti HPC



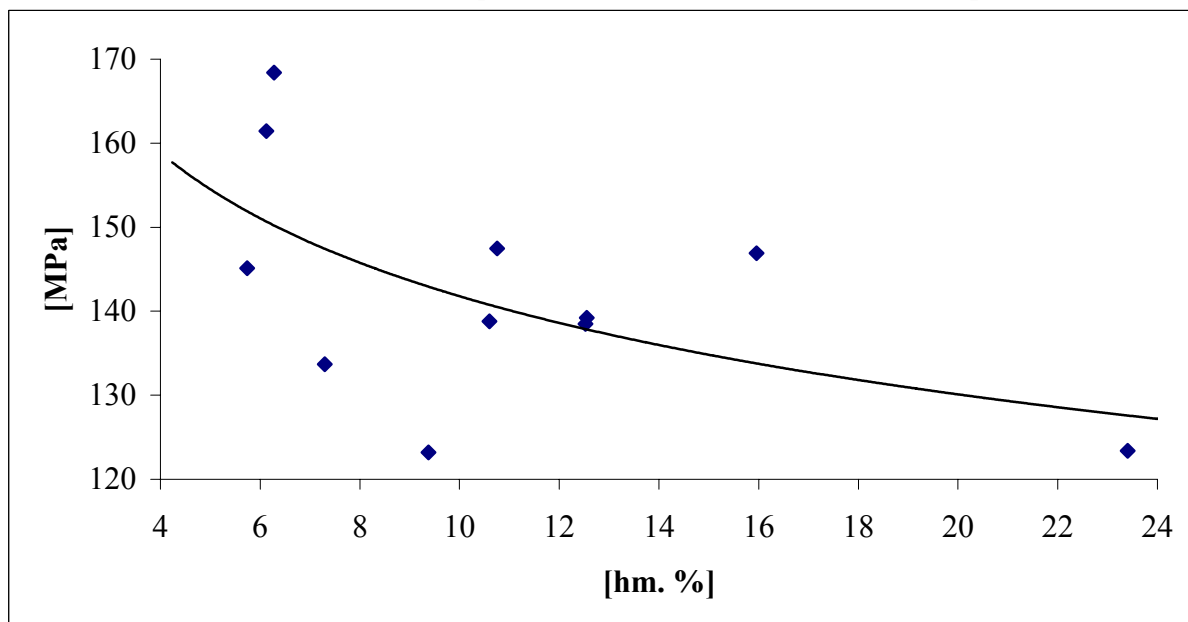
Graf 9: Závislost 28 denních pevností v tahu za ohybu na množství použitého SUK



Graf 10: Závislost 28 denních pevností v tlaku na množství použitého SUK



Graf 11: *Závislost 28 denních pevností v tahu za ohybu na množství použité VPS*



Graf 12: *Závislost 28 denních pevností v tlaku na množství použité VPS*

Velmi jemně mletá granulovaná vysokopecní struska (VPS) a velmi jemně mletý křemen (SUK) slouží ve vysokohodnotných betonech spíše jako náhrada cementu, jejich procentuální zastoupení v záměsích se pohybovala v rozmezí od 6 až do 24 hm. %. Vyšší procentuální zastoupení obou těchto složek ve vysokohodnotných betonech se jeví spíše jako nežádoucí, dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Naopak spíše nižší použité množství vedou k lepším mechanickým vlastnostem betonových kompozitů.

Jako velmi přínosné se jeví společné použití obou těchto složek – SUK a VPS a to v případě jejich shodného zastoupení v dané záměsi. Například v záměsi 3. byla každá z obou uvedených složek zastoupena z 16 hm. %, což znamená, že dohromady tvořily tyto složky 32 %, tedy téměř třetinu, z celkové hmotnosti záměsi a i tak dosahovaly naměřené pevnosti

zkušebních trámců velice uspokojivých výsledků (19,5 MPa v tahu za ohybu a 146,9 MPa v tlaku) po 28 dnech vlhkého uložení.

Grafy č. 9 až 12 byly opět pro lepší názornost proloženy směrnici trendu mocninného typu, která poukazuje na fakt, že vyšší obsah těchto složek ve směsích spíše zhoršuje mechanické vlastnosti betonových kompozitů, jejichž odolnost vůči tlakovému namáhání klesá.

4.3.4 Vliv podílu bauxitu na mechanické vlastnosti HPC

Záměsi tvořené pouze cementem a bauxitem dosahují vyšších pevností v tahu za ohybu a to jak po 7, tak i po 28 dnech, nežli záměsi tvořené pouze cementem a jemně mletou vysokopepní granulovanou struskou (viz. Tab. 4.1 a 4.3 záměsi 23. a 24.).

Nejlepší mechanické vlastnosti vykazovaly vzorky záměsí, ve kterých se množství použitého bauxitu pohybovalo v rozmezí 43 až 46 hm. %.

5 ZÁVĚR

Postupem času se s nároky na zvýšení kvality používaných materiálů začaly rovněž zvyšovat nároky na kvalitu a současně i míru použitelnosti vysokopevnostních betonů. Zvrat přišel s prvním použitím plastifikačních přísad při výrobě betonů, poněvadž najednou tu byla možnost vyrobit betony mnohem lepších mechanických vlastností, nežli v případě do té doby hojně vyráběných betonů vyšších pevností. Označení „vysokopevnostní beton“ již nadále nevystihovalo celkové vylepšení vlastností této nově vzniklé skupiny betonů, proto se začal stále více prosazovat termín „vysokohodnotný beton“, který si upevnil jistou hladinu významnosti na poli odborné terminologie, zejména pak v případě, kdy bylo při výrobě užito prvních superplastifikačních přísad, které snížením hodnoty vodního součinitele ještě natolik vylepšily vlastnosti betonu, že již nebylo sporu o správnosti užívání tohoto termínu. Označení „vysokohodnotný beton“ tak znamená nejen beton s vyšší pevností, jakožto majoritní vlastností, ale i s mnoha dalšími důležitými vlastnostmi – vyšší modul pružnosti, lepší odolnost vůči obrusu, lepší zpracovatelnost, vyšší trvanlivost ap. Zlepšením vlastností těchto betonů se zlepšuje míra jejich použitelnosti nejen ve stavebnictví, ale i v dalších příbuzných oborech.

Předložená diplomová práce pojednává o míře vlivu složení na mechanické vlastnosti vysokohodnotného betonu (HPC). Pozornost byla především věnována na určení míry vlivu proměnlivého obsahu jednotlivých použitých složek na výsledné hodnoty pevností v tlaku a v tahu za ohybu, jakožto dvou, pro vysokohodnotné betony podstatných, mechanických vlastností. Cílem této práce tedy bylo připravit sérii vzorků HPC s proměnným obsahem jednotlivých komponent a u takto připravených vzorků pak stanovit právě míru vlivu proměnného obsahu jednotlivých komponent na jejich mechanické vlastnosti, tedy zejména na výsledné pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu.

Nejprve byl vytvořen plán experimentů, na jehož základě bylo připraveno celkem 29 vzorků záměsí HPC. Tento počet vzorků bylo možno rozdělit na 25 záměsí s dostatečnou zpracovatelností a 4 záměsí s nedostatečnou zpracovatelností. Při samotné přípravě záměsí byly použity a zároveň i kombinovány následující materiály: cement Aalborg White (52,5 N), Mikrosilika Elkem Grade 971-U, jemně mletá granulovaná vysokopecní struska SMŠ 420 VP-6, velmi jemně mletý křemen, kalcinovaný bauxit (frakce 0 až 1 mm) a superplastifikátor Glenium ACE 40 ze skupiny polykarboxylátů. Mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku a v tahu za ohybu) jednotlivých vzorků HPC byly měřeny pomocí tlakového lisu a Michaelisova přístroje na trámčích o rozměrech 40×40×160 mm a to vždy po 7 a 28 dnech uložení ve vlhkém prostředí. Dosažené pevnosti v tlaku se po 7 dnech vlhkého uložení pohybovaly v rozmezí hodnot od 71,5 až do 170 MPa, kdežto pevnosti v tahu za ohybu se po shodně dlouhém časovém uložení pohybovaly v rozmezí hodnot od 6,2 do 19,2 MPa. Hodnoty pevností, které byly měřeny po 28 dnech uložení trámčů ve vlhkém prostředí, byly následující: pevnosti v tlaku se pohybovaly v intervalu hodnot od 92 až do 193,5 MPa, naproti tomu pevnosti v tahu za ohybu nabývaly hodnot od 7,4 do 22,8 MPa. Nejvyšší dosažené hodnoty pevností byly následující: 170 a 193,5 MPa pro 7 a 28 denní pevnosti v tlaku; 19,16 a 22,76 MPa pro 7 a 28 denní pevnosti v tahu za ohybu. Nejvyšší hodnoty pevností náležely záměsím číslo 8. a 16., kdy v případě záměsí 8. se jedná o nejvyšší naměřené hodnoty pevností v tlaku a u záměsí číslo 16. byly naopak naměřeny nejvyšší hodnoty pevností v tahu za ohybu (viz. Tab. 4.3 na straně 38).

Dalším úkolem bylo sestavit a vyhodnotit grafy závislostí mechanických parametrů na obsahu jednotlivých složek v záměsích. Byly sestaveny a následně vyhodnoceny grafy

závislostí 28 denních pevností v tlaku a v tahu za ohybu na množství vždy jedné z pěti, na přípravu záměsí, použitých složek. V souladu s informacemi získanými v rámci literární rešerše byly grafy proloženy spojnicí trendu mocninného typu. Byly tak stanoveny míry vlivu každé z použitých složek na mechanické parametry HPC.

Podíl použitého cementu Aalborg White v záměsích se pohyboval v rozmezí od 29 do 74 hm. %. Jelikož nejvyšší hodnoty pevností v tlaku i v tahu za ohybu byly naměřeny u záměsí 8. a 16., ukazuje se, že optimální použité množství cementu z celkové hmotnosti záměsí se pro dosažení, pokud možno co nejlepších mechanických vlastností, pohybuje v rozmezí od 31 do 33 hm. % a to nejlépe s použitím kalcinovaného bauxitu jako kameniva a křemičitých úletů (mikrosiliky) jako plniva.

Podíl použité mikrosiliky v záměsích se pohyboval v rozmezí od 9 do 25 hm. %. Nejlepší dávkování pro tuto složku, při němž bylo dosaženo nejlepších mechanických vlastností HPC, se pohybuje v rozmezí 10 – 14 % z celkové hmotnosti záměsí. Z grafů č. 7 a 8 (viz. strana 44) je taktéž patrné, že při vyšších podílech mikrosiliky obsažené ve vzorcích HPC, klesají hodnoty měřených pevností v tlaku a v tahu za ohybu. Nicméně, bylo znát, že vyšší procentuální obsah mikrosiliky v záměsích zlepšuje jejich zpracovatelnost – tzn. směsi vykazovaly lepší reologické chování, které lze zřejmě vysvětlit tím, že extrémně malé částičky křemičitých úletů s velkým měrným povrchem vytěsňují vodu z mezer mezi zrny cementu a tak roste podíl vody pro ztekucení betonové směsi. Po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu na trámcih betonových kompozitů, které obsahovaly mikrosiliku, byl již pouhým okem patrný rozdíl ve struktuře lomu v porovnání se vzorky, které mikrosiliku neobsahovaly. Zejména pak vyššími podíly křemičitých úletů ve směsi bylo dosaženo velmi kompaktní mikrostruktury, neboť tyto velmi malé částice sehrály roli plniva, kdy vyplnily mezery mezi jednotlivými zrny cementu a kamenivem v podobě použitého bauxitu.

Velmi jemně mletá granulovaná vysokopeční struska (VPS) a velmi jemně mletý křemen (SUK) mohou do jisté míry nahradit obsah cementu v HPC, což zajisté nese i nemalé ekonomické výhody. Procentuální zastoupení VPS a SUK v záměsích se pohybovala v rozmezí od 6 až do 24 hm. %. Vyšší procentuální zastoupení obou těchto složek ve vysokohodnotných betonech se jeví spíše jako nežádoucí, poněvadž dochází ke zhoršení mechanických vlastností. Naopak spíše nižší použitá množství vedou k lepším mechanickým vlastnostem betonových kompozitů. Velmi přínosně se jevílo společné použití obou těchto složek a to v případě jejich shodného zastoupení v dané záměsí, jako v například v případě záměsí 3., v níž byla každá z obou uvedených složek zastoupena z 16 hm. %. Dohromady tak tvořily tyto složky 32 %, tedy téměř třetinu, z celkové hmotnosti záměsí a i tak dosahovaly naměřené pevnosti zkušebních trámcih velice uspokojivých výsledků (19,5 MPa v tahu za ohybu a 146,9 MPa v tlaku) po 28 dnech vlhkého uložení.

Množství kalcinovaného bauxitu, jakožto složky plnící v záměsí funkci kameniva, se pohybovala v rozmezí od 21 do 46 hm. %. Nejlepších mechanických vlastností v případě HPC bylo dosaženo použitím bauxitu jako kameniva do směsí tvořených cementem a mikrosilikou. V případě záměsí cementu (pojivo) s bauxitem (kamenivo) a dalšími složkami (VPS, SUK, SF) se jeví vliv frakce kalcinovaného bauxitu 0 až 1 mm na výsledné pevnosti v tahu za ohybu jako minimální. Naproti tomu bylo zjištěno, že záměsí tvořené pouze cementem a bauxitem dosahují vyšších pevností v tahu za ohybu a to jak po 7, tak i po 28 dnech, nežli záměsí tvořené pouze cementem a jemně mletou vysokopeční granulovanou struskou (viz. Tab. 4.1 a 4.3 záměsí 23. a 24.). Souvislost mezi množstvím použitého bauxitu a 28 denními pevnostmi v tlaku zkušebních trámcih se jeví tak, že vyšší podíly použitého

bauxitu zjevně zlepšují tyto mechanické vlastnosti HPC. Nejlepší mechanické vlastnosti vykazovaly vzorky záměsí, ve kterých se množství použitého bauxitu pohybovalo v rozmezí 43 až 46 hm. %.

Rovněž byly sestrojeny grafické závislosti 28 denních pevností v tlaku i v tahu za ohybu na postupně vzrůstajících hodnotách vodního součinitele (viz. grafy č. 3 a 4), na kterých byla prokázána známá skutečnost, že se vzrůstající hodnotou vodního součinitele klesá pevnost v tlaku i v tahu za ohybu zkoumaného vzorku HPC.

Na základě hodnot mechanických vlastností korespondujících se složením záměsí 2., 19., 23. a 24, bylo zjištěno, že dochází ke zvyšování hodnot tlakových pevností v pořadí: B < SUK < VPS < SF, což znamená, že kombinací samotného cementu s kalcinovaným bauxitem nedosáhneme takových hodnot tlakových pevností, jako v případě kombinace cementu s křemičitými úlety. V případě hodnot pevností v tahu za ohybu se pořadí vlivu jednotlivých komponent na výsledné pevnosti jeví takto: VPS < B < SUK < SF, neboli, záměs tvořená cementem a jemně mletou vysokopecní granulovanou struskou nedosahovala takových hodnot pevností v tahu za ohybu, jako v případě záměsí tvořené cementem a křemičitými úlety.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] **Aïtcin, P.-C.:** *Vysokohodnotný beton*, 1. české vydání: Praha, Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [2] **ČSN EN 197-1**, Cement Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. ČSNi, Praha, 2003.
- [3] **Kratochvíl B., Švorčík V., Vojtěch D.:** *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. 190 s. ISBN 80-7080-568-4.
- [4] **Vernet, C.:** *Mécanismes chimiques d'interactions ciment-adjuvants*, CTG Spa.Guerville Service Physico-Chimie du Ciment, Janv. 1995, 10 p.
- [5] Dostupné z WWW:
<<http://www.aalborgwhite.com/default.aspx?m=2&i=62>>.
- [6] Dostupné z WWW:
<<http://www.avas-concrete.com/produkty/dansky-superbily-portland.php>>.
- [7] Dostupné z WWW:
<<http://www.stavebnitechnologie.cz/view.php?cislocclanku=2002033101>>.
- [8] **Szklorzová H., Těhník V., Brandštetr J.:** *Použití plastifikátorů ve stavebnictví – přechod od staré k nové generaci*, 11. Sborník z konference Betonářské dny z Hradce Králové, Vyd. Hradec Králové: Česká betonářská společnost, 2004, p. 607 - 614. ISBN 80-903501-3-5, prosinec 2004.
- [9] **Ramachandran, V.S.:** *Concrete Admixtures Handbook - Properties, Science, and Technology*. 2nd edition: Noyes Publications. 1995. 1182 p. ISBN 0-8155-1373-9.
- [10] **Příručka technologa:** *Beton – suroviny, výroba, vlastnosti*, 2. aktualizované vydání: Českomoravský beton – Heidelberg Cement Group, Českomoravský cement – Heidelberg Cement Group, Českomoravské šterkovny – Heidelberg Cement Group, 2005.
- [11] **Doc. Ing. Luboš Svoboda a kolektiv:** *Stavební hmoty.*, první české vydání: Bratislava: Vydavatelství Jaga group, s. r. o., 2004. ISBN 80-8076-007-1.
- [12] **Šiler, P.:** *Studium adsorpce superplastifikátorů na povrchu tuhých složek vysokohodnotného betonu*, Diplomová práce, FCH VUT Brno, 2006.
- [13] **Hlaváč, J.:** *Základy technologie silikátů*. 2. upravené vydání: Praha SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 80-200-2148-4.

- [14] **Stark U., Müller A.**, *Particle distributor of cements and minerals admixtures – standards and sophisticated measurements*, Proceeding of the 11th international congress on the chemistry of cement (ICCC), Cement's contribution to the development in the 21th century, Durban, South Africa, ISBN nb. 0-9584=85-8-0, 2003.
- [15] **Škvára, F.**: *Technologie anorganických pojiv – užití maltovin, koroze cementu*, Fakulta chemické technologie, VŠCHT Praha, 1995.
- [16] **Brandštetr J., Krátký J., Szklorzová H.**: *Kopolymerní kompozity vysokých pevností netradičního složení*, TELČ 2004.
- [17] **Brandštetr J., Lukáš J., Krátký J., Hanáková Z.**: *Mikrokamenivo jako složka betonů vysokých užitných vlastností*, SILIKA 2003, 1 – 2, 2003.
- [18] **Kostuch J., Walters V., Jones T.**: *High performance concretes incorporating metakaolin: a review*. In: Dhir RK, Jones MR, editors. Concrete 2000. E&FN Spon; 1993. p. 1799 – 811.
- [19] **Doc. RNDr. Jana Novovičová, CSc.**: *Pravděpodobnost a matematická statistika*, Fakulta dopravní, ČVUT Praha, 2006.
- [20] **Ing. Zdeněk Špetík**: *Analýza rozptylu, školicí materiál pro technické pracovníky TESLA SEZAM, a. s.*, Verze A, Říjen 2000. TESLA SEZAM, a. s., Rožnov p.R.
- [21] **Ing. Zdeněk Špetík**: *Základní kurz statistiky, školicí materiál pro technické pracovníky Tesla SEZAM, a. s.*, Verze B, Říjen 1999. TESLA SEZAM, a. s., Rožnov p.R.
- [22] **Jiju Antony**: *Design of experiments for engineers and scientists.*, Elsevier Science & Technology Books (Butterworth-Heinemann), October 2003. ISBN 0-7506-4709-4.
- [23] **Ing. Zdeněk Špetík**: *Návrh a analýza plánovaných experimentů I, školicí materiál pro technické pracovníky Tesla SEZAM, a. s.*, Leden 2001. TESLA SEZAM, a. s., Rožnov p.R.
- [24] **Krátký, J.**: *Vliv přísad na vlastnosti anorganicko organických kompozitů*, Disertační práce, FCH VUT Brno, 2004, 76 s.
- [25] **Bartoničková, E.**: *Vliv druhů a množství mikromletých příměsí na fyzikálně – mechanické vlastnosti vysokopevnostních betonů na bázi portlandského cementu*, Diplomová práce, FCH VUT Brno, 2005.
- [26] **ČSN 72 2117**: 1970. Stanovení pevnosti cementu. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci měření, 1970. 1-7s.

7 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PC	portlandský cement
A	Al_2O_3
H	H_2O
C	CaO
S	SiO_2
$\bar{\text{S}}$	SO_3
F	Fe_2O_3
Ca(OH)_2	portlandit
C_3S	trikalciumsilikát (alit)
C_2S	dikalciumsilikát (belit)
C_3A	trikalciumaluminát
C_4AF	tetrakalciumaluminátferit (celit, brownmillerit)
$\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	ettringit
$\text{C}_4\text{ASO}_3\text{H}_{12}$	monosulfát
C-S-H gel	kalciumhydrosilikátový gel
HPC	high performance concrete, vysokohodnotný beton
HSC	high strength concrete, vysokopevnostní beton
w/c	vodní součinitel (poměr voda/cement)
w/(c + p)	vodní součinitel (poměr voda/cement + příměsi)
VPS	vysokopeční struska
SUK	speciálně umletý křemičitý písek
SF	silica fume, křemičité úlety
AW	cement Aalborg White
B	kalcinovaný bauxit (frakce 0 až 1 mm)
SP	superplastifikátor
[g]	množství v gramech
ANOVA	analysis of variance, analýza rozptylu
DOE	design of experiments, plánovaný návrh experimentů
d_{10}	průměrná velikost částic pod 10 %
d_{50}	střední průměrná velikost částic
d_{90}	průměrná velikost částic pod 90 %